

ZUM STAND DER DIFFERENTIELLEN KINEMATISCHEN GPS-POSITIONIERUNG

von

DR.-ING. TORBEN SCHÜLER

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen (BauV) der Universität des Bundeswehr München zur Feststellung der Lehrbefähigung im Fachgebiet Geodäsie und Navigation sowie zur Verleihung des akademischen Grades eines habilitierten Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing. habil.) genehmigten schriftlichen Habilitationsleistung.

*Vorsitzender des
Habilitationsausschusses:*

UNIV.-PROF. DR.-ING. STEFAN M. HOLZER
Institut für Mathematik und Bauinformation
Universität der Bundeswehr München
Dekan der Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen

*Gutachter der schriftlichen
Habilitationsleistung:*

UNIV.-PROF. DR.-ING. HABIL. GÜNTER W. HEIN
Institut für Erdmessung und Navigation
Universität der Bundeswehr München

UNIV.-PROF. DR.-ING. PROF. H.C. GÜNTER SEEBER
Institut für Erdmessung
Universität Hannover

UNIV.-PROF. DR.-ING. HABIL. BERND EISSFELLER
Institut für Erdmessung und Navigation
Universität der Bundeswehr München

Die schriftliche Habilitationsleistung wurde am 6. Juni 2005 bei der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München eingereicht.

Die mündliche Habilitationsleistung wurde am 24. November 2006 abgelegt.

Zusammenfassung

GPS hat sich in den letzten 15 Jahren zu einem wichtigen Werkzeug für die kinematische Positionsbestimmung entwickelt. Über kurze Basislinien können häufig Genauigkeiten von ca. 1 cm erzielt werden (Standardabweichung), doch bedingt dies im Allgemeinen den Betrieb einer Referenzstation in der Nähe des sich bewegenden Nutzers (»Rover«), um die Fehlereinflüsse wirksam reduzieren zu können. Im Sinne der Wirtschaftlichkeit besteht eine Notwendigkeit, Referenzstationsnetze so grobmaschig anzuordnen, wie es unter Berücksichtigung der jeweiligen Genauigkeitsanforderungen noch möglich ist. Aktive Referenzstationsnetzwerke - wie sie beispielsweise in Deutschland zwischenzeitlich errichtet wurden - weisen Entfernungen von durchschnittlich ca. 50 km auf und nutzen ihre GPS-Daten zur Ableitung von ionosphärischen, troposphärischen sowie satellitenspezifischen Flächenkorrekturen. Dieses moderne Konzept kann bei verschiedenen wissenschaftlichen Anwendungen auf Grund mangelnder Voraussetzungen nicht zur Anwendung kommen. In dieser Arbeit wird deshalb an das konventionelle Basislinien-Konzept angeknüpft und versucht, auch über lange Entfernungen eine kinematische Positionierung hoher Genauigkeit durchzuführen. Neben einer Einführung in die Grundlagen und die Beschreibung des Fehlermodells wird demonstriert, dass im kinematischen Modus in der Tat exakte Punktbestimmungen über bis zu etwa 300 km möglich sind. Eine wesentliche Limitierung bei der angewandten Methode liegt in den für diese Zwecke zu schlechten Sichtbarkeitsverhältnissen der GPS-Satelliten. Eine höhere Zahl an sichtbaren Satelliten würde die Situation verbessern. Aus diesem Grunde geht die Arbeit abschließend auf die anstehenden Innovationen in der Satellitennavigation ein und stellt ihre Bedeutung für die kinematische Positionierung heraus.

Abstract

GPS has become a valuable means for kinematic positioning in the past 15 years. An accuracy of approximately 1 centimetre (standard deviation) can be reached over short baselines, but a reference station needs to be established in the vicinity of the roving antenna in order to appropriately reduce the acting error sources. Economic considerations, however, require that reference station networks are planned such that the spatial resolution is kept at a minimum while taking the required accuracy of the kinematic solution as a primary design parameter. Active reference station networks in Germany, for instance, have inter-station distances of about 50 kilometres in average. The stations' data are used to derive ionospheric, tropospheric and satellite-specific area correction parameters. Unfortunately, this state-of-the-art methodology cannot be used in many scientific applications as it is failed to fulfil necessary pre-requisites. Consequently, the work depicted in this report aims to apply the conventional baseline concept to reach high accuracy in kinematic positioning even over long distances to the reference station(s). Apart from an introduction to the basics of kinematic GPS data analysis and the description of the underlying error model it will be demonstrated that precise coordinates can actually be retrieved over baselines as long as about 300 km in kinematic mode. A major limitation of this method lies in the fact that the current GPS visibility situation is relatively weak for this purpose, i.e. a larger number of visible satellites would significantly improve the situation. For this reason, this report concludes in outlining the innovations in satellite navigation which are about to become reality in the very near future and have an incisive impact on position estimation »on the move«.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einführung	17
1.1	Kinematische Positionsbestimmung	17
1.2	Konzepte und eigener Lösungsansatz	18
1.2.1	Eigener Lösungsansatz	19
1.3	Struktur und Zielsetzung der Arbeit	20
1.4	Verwendete Software	21
2.	Grundlagen der kinematischen Positionsbestimmung	23
2.1	Beobachtungen und Beobachtungsgleichungen	23
2.1.1	Strecken- und Trägerphasen-Messungen	23
2.1.1.1	Geometrische Distanz und Phasenzentrum der Antenne	24
2.1.1.2	Allgemeine Formulierung	24
2.1.2	Doppelte Differenzen	25
2.1.3	Dreifache Differenzen	25
2.1.4	Linearkombinationen	25
2.2	Parameterschätzung	27
2.2.1	GAUSS-MARKOV-Modell	27
2.2.1.1	Algorithmus	27
2.2.1.2	Partitionierung	29
2.2.1.3	Qualitätskontrolle	30
2.2.1.4	Anwendung zur GPS-Positionierung	30
2.2.1.4.1	Einzelstationslösung (Schritt 1)	31
2.2.1.4.2	DGPS-Positionslösung (Schritt 2)	32
2.2.1.4.3	Zeitlich relative Trägerphasenlösung (Schritt 3)	33
2.2.1.4.4	Blockausgleichung der Trägerphasen (Schritt 4)	34
2.2.1.4.5	Zeitliche Verdichtung der PDGPS-Lösung (Schritt 5)	36
2.2.2	Sequenzielle Schätzung über das KALMAN-Filter	37
2.2.2.1	Eigenschaften	37
2.2.2.2	Anwendungsfall und Algorithmus	38
2.2.2.3	Rückwärtsfilterung	41
2.2.2.4	Erkennung von Modell- und Beobachtungsfehlern	41
2.2.2.5	Vor- und Nachteile für die GPS-Datenanalyse	42
2.3	Fixierung der Trägerphasen-Mehrdeutigkeiten	43
2.3.1	Suche im Positionsraum	43
2.3.2	Suche im Beobachtungsraum	44
2.3.2.1	Geometriefreie Mehrdeutigkeitsbestimmung	44
2.3.2.1.1	Grundprinzip	44
2.3.2.1.2	Glättung	45
2.3.2.1.3	Genauigkeitsabschätzung	46
2.3.2.1.4	Prüfung	48
2.3.2.1.5	Ausnutzung von Nebenbedingungen	48
2.3.2.2	Geometriebasierte Verfahren	48
2.3.2.2.1	Fixierung der Mehrdeutigkeiten	49
2.3.2.2.2	Qualitätsprüfung	51
2.3.3	Geometriereduzierter Ansatz	52
2.3.3.1	Bestimmung über Trägerphasenmessungen	52
2.3.3.2	Ausnutzung von Redundanzen	52
2.3.4	Lösungsstrategien	53
3.	Funktionale und stochastische Modellierung von Fehlern	55
3.1	Überblick	55
3.2	Methodik	55
3.2.1	Elimination von Fehlern	57
3.2.2	Funktionale Modellierung	57

3.2.3	Stochastische Modellierung	57
3.2.3.1	Fehlerfortpflanzung	57
3.2.3.2	Nicht-korrelierend wirkende Fehler	58
3.2.3.3	Korrelierend wirkende Fehler	58
3.2.3.3.1	Funktionale Korrelation	58
3.2.3.3.2	Stochastische Korrelation	58
3.2.4	Berücksichtigung systematisch wirkender Fehler	59
3.3	Instrumentelle Fehlerquellen	59
3.3.1	Messrauschen der Trägerphasen	59
3.3.2	Laufzeitverzögerungen in der Hardware	61
3.3.2.1	Systematische Fehler zwischen den Frequenzen	61
3.3.2.2	Systematische Fehler zwischen den Kanälen	61
3.3.2.3	Systematische Fehler zwischen C/A- und P_1 -Kode-Strecken	61
3.3.3	Antenne	62
3.3.3.1	Exzentrizität	62
3.3.3.2	Phasenzentrum	63
3.3.3.2.1	Antennenphasenzentrums-Offset	63
3.3.3.2.2	Korrekturfunktion in Abhängigkeit vom Elevationswinkel	64
3.3.3.2.3	Beeinflussung durch äußere Effekte	65
3.3.3.3	Orientierung (»Phase Wind-Up«)	65
3.3.4	Synchronisation der Daten	66
3.4	Aus der Umgebung resultierende Fehler	66
3.4.1	Phasensprünge (»Cycle Slips«)	66
3.4.1.1	Vergleich von Strecken- und Phasenmessungen	66
3.4.1.2	Differenz-Filter	67
3.4.1.3	Vergleich von Doppler- und Phasenmessungen	69
3.4.1.4	Geometriefreie Kombination von L_1 - L_2 -Trägerphasen	69
3.4.2	Mehrweg (»Multipath«) und Signalbeugung	69
3.4.2.1	Ausnutzung der zeitlichen Korrelation	70
3.4.2.2	Antennendesign	70
3.4.2.3	Signalverarbeitung im Empfänger	70
3.4.2.4	Modellierung	70
3.4.2.5	Detektion	72
3.4.2.6	Stochastische Modellierung	75
3.4.3	Relativistische Effekte	76
3.4.3.1	Übersicht	76
3.4.3.2	Radar Delay Effekt	77
3.4.4	Bewegungskorrektur	77
3.4.5	Gezeiten der festen Erde	77
3.4.6	Ozeanische Auflasten	78
3.4.7	Erdrotation, Polposition	78
3.4.8	Satellitenbahn	79
3.4.9	Atmosphärische Refraktion	80
3.4.9.1	Ionosphäre	80
3.4.9.1.1	Abspaltung des deterministischen Anteils	81
3.4.9.1.2	Stochastisches Modell für die Ionosphäre	87
3.4.9.1.3	Systematische Fehlerwirkung	92
3.4.9.1.4	Auswerte-Strategie mit Bezug auf den Ionosphären-Fehler	92
3.4.9.2	Troposphäre und Stratosphäre	94
3.4.9.2.1	Hydrostatische Laufzeitverzögerung	94
3.4.9.2.2	Feuchte Laufzeitverzögerung	95
3.4.9.2.3	Abspaltung des deterministischen Anteils	95
3.4.9.2.4	Bestimmung des stochastischen Verhaltens	98
3.4.9.2.5	Systematische Fehlerwirkung	101
3.4.9.2.6	Aspekte der funktionalen Modellierung	102
3.5	Behandlungsmethodik	108
3.5.1	Beobachtungsgleichung	108

3.5.2	Koordinatengleichung	108
3.5.3	Test der Mehrdeutigkeitsfixierung	109
4.	Bezugssystem und Referenzstationen	111
4.1	ETRS als Beispiel für ein modernes Bezugssystem	111
4.1.1	Konzept	112
4.1.2	Genauigkeitsklassen	113
4.1.3	Auswertestrategie	113
4.2	Modellierung von Koordinatenänderungen	113
4.2.1	Lineares Bewegungsmodell	114
4.2.1.1	Modellfunktion	114
4.2.1.2	Genauigkeitsabschätzung	115
4.2.1.3	Ableitung von Geschwindigkeitsvektoren für Neupunkte	115
4.2.1.3.1	Starrkörperbewegung	115
4.2.1.3.2	Finite Dreieckselemente	117
4.2.1.3.3	Höhenkomponente - postglaziale Landhebung	120
4.2.2	Erweitertes Bewegungsmodell	121
4.2.2.1	Modellfunktion	121
4.2.2.2	Saisonale Variationen	122
4.2.2.3	Atmosphärische Druckauflasten	123
4.2.3	Koordinatensprünge	125
4.2.3.1	Erweiterung der Modellfunktion	125
4.2.3.2	Einfluss von Erdbeben	125
4.3	Abschließende Bemerkungen	129
5.	Experimentelle Prüfung	131
5.1	Überprüfung der statistischen Verteilung	131
5.1.1	Messungen auf einer »Null-Basislinie«	131
5.1.2	Datenanalyse	131
5.1.3	Vergleich mit Soll-Verteilung	133
5.2	Interpolation von Messdaten	134
5.2.1	Algorithmus	136
5.2.2	Testbeispiel	136
5.3	Positionierungs-Experimente	137
5.3.1	Sehr kurze Basislinie	138
5.3.1.1	Statische Positionierung	138
5.3.1.2	Kinematische Positionierung	139
5.3.2	Vergößerter Entfernungsbereich	139
5.3.2.1	Gegenüberstellung der Lösungen	140
5.3.2.2	Residuen-Analyse	142
5.3.2.3	Höhen-Analyse	143
5.3.2.4	Systematische Fehlerwirkung	143
5.3.2.4.1	Mehrdeutigkeiten	145
5.3.2.4.2	Positionen	149
5.4	Zusammenfassung und abschließende Bemerkungen	150
6.	Radaraltimeter-Kalibrierung mit GPS-Bojen	151
6.1	Planung und Technische Beschreibung	151
6.1.1	Grundlegendes und Vorteile des Verfahrens	151
6.1.2	Missionsplanung	152
6.1.2.1	Terminplanung	152
6.1.2.2	Kriterien zur Auswahl des Kalibriergebietes	152
6.1.2.2.1	Kreuzungspunkt und Bojenpositionen	153
6.1.2.2.2	Tiefenprofile	154
6.1.2.2.3	Beschaffenheit des Meeresbodens	154
6.1.3	Technische Aspekte	154
6.1.3.1	Hochseebojen	154

6.1.3.1.1	Verankerung und Stabilisierung	155
6.1.3.1.2	Bordcomputer und Kommunikation	156
6.1.3.1.3	Sensor-Technik	157
6.1.3.2	Referenzstation	157
6.1.3.3	Technische Verbesserungsmöglichkeiten	158
6.2	Datenverarbeitung und Ergebnisse	159
6.2.1	Höhenbestimmung für die Referenzstation	159
6.2.2	Bojenpositionierung	160
6.2.2.1	Kurze Basislinien (CIU1, CIU2)	160
6.2.2.2	Lange Basislinien	161
6.2.2.2.1	Verwendung der Referenzstationen MADR und MATE	162
6.2.2.2.2	Verwendung der Referenzstationen TLSE, GRAS, AJAC	163
6.2.2.2.3	Zusammenfassende Bewertung	167
6.2.3	Reduktion der Höhen	167
6.3	Wertung und Ausblick	168
7.	Wasserdampfbestimmung auf bewegten Trägern	169
7.1	Kinematische und statische Wasserdampfbestimmung	169
7.1.2	Troposphärische Laufzeitverzögerung	169
7.1.3	Konvertierung in den Wasserdampfgehalt	170
7.1.4	Trägerplattformen	170
7.2	Fahrten des Forschungsschiffs »Alkor«	172
7.2.1	Fahrt im Juni 2001	172
7.2.2	Fahrt im Oktober/November 2001	174
7.3	Fahrten des Ölauffangschiffs »Bottsand«	175
7.3.1	Fahrten im Jahr 2001	175
7.3.2	Fahrten im Jahr 2002	175
7.3.2.1	Änderungen im Jahr 2002	175
7.3.3	Fahrten im Jahr 2003	180
7.4	Abschließende Bemerkungen	180
8.	Abschließende Bemerkungen	181
8.1	Rückblick	181
8.2	Ausblick	181
8.2.1	Verbesserung des GPS	181
8.2.2	Aufbau von GALILEO	182
8.3	Schlussbemerkungen	183
9.	Bibliografie	185
	Danksagung	199

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1:	Vereinfachte Darstellung der wesentlichen Konzepte zur präzisen ...	18
Abb. 1.2:	Konzept des gewählten Ansatzes zur kinematischen Positionierung unter ...	19
Abb. 1.3:	Aufbau der Arbeit »Zum Stand der kinematischen GPS-Positionsbestimmung«.	20
Abb. 2.1:	Verarbeitungsschritte für die kinematische GPS-Positionierung mit der im ...	31
Abb. 2.2:	Darstellung der Lösungsketten zur Bestimmung der Mehrdeutigkeiten.	53
Abb. 3.1:	Simulationsszenario mit dem EPSS-Simulator des Instituts für Erdmessung ...	71
Abb. 3.2:	Über Raytracing ermittelter Mehrwege-Fehler auf den Trägerphasen für die ...	71
Abb. 3.3:	Ergebnis der Mehrweg-Analyse für die Referenzstation IF1A in Abhängigkeit ...	73
Abb. 3.4:	Elevation β des Satelliten PRN1 sowie Multipath-Signal MP zwischen 02:22 ...	73
Abb. 3.5:	Auto-Korrelationsfunktion für die Zeitreihe des Satelliten PRN1.	74
Abb. 3.6:	Frequenz-Amplituden-Diagramm für die Zeitreihe des Satelliten PRN1.	74
Abb. 3.7:	Geometrischer Zenitwinkel der Bodenstation A zum Satelliten i und ...	83
Abb. 3.8:	Karte des Koeffizienten a_M (mittlerer Offset) in [TECU].	84
Abb. 3.9:	Karte des Koeffizienten b_M (mittlere Amplitude) in [TECU].	84
Abb. 3.10:	Karte des Bestimmtheitsmaßes (Anteil erklärter Varianz).	85
Abb. 3.11:	Karte der Standardabweichung der Gewichtseinheit in [TECU].	85
Abb. 3.12:	Gegebene VTEC-Werte (rot) und ausgeglichene Modellfunktion (grün).	86
Abb. 3.13:	Ausschnitt im Zeitfenster von DoY 129 bis 159 zur Veranschaulichung der ...	86
Abb. 3.14:	Korrelationskoeffizienten relativ zum geozentrischen Breitengrad $47,5^\circ$ N.	88
Abb. 3.15:	Korrelationskoeffizienten relativ zum Längengrad $10,0^\circ$ O.	88
Abb. 3.16:	Korrelationskoeffizienten zwischen den einzelnen Modellgitterpunkten relativ ...	89
Abb. 3.17:	Bestimmte Korrelationskoeffizienten, aufgetragen in Abhängigkeit von der ...	91
Abb. 3.18:	Einteilung der Atmosphäre unter verschiedenen Ordnungskriterien; ...	94
Abb. 3.19:	Bestimmte Kreuz-Korrelationen für den Luftdruck zwischen den einzelnen ...	99
Abb. 3.20:	Bestimmte Kreuz-Korrelationen für die feuchte Laufzeitverzögerung zwischen ...	100
Abb. 3.21:	Auto-Korrelationsfunktionen zur Beschreibung der vertikalen Dekorrelation ...	101
Abb. 3.22:	Auto-Korrelationsfunktionen zur Beschreibung der vertikalen Dekorrelation...	102
Abb. 3.23:	Perspektivdarstellung der durch Vernachlässigung der Laufzeitverzögerungen ...	103
Abb. 4.1:	Gegenwärtiger Ausbaustand bzgl. der Permanentstationen des EUREF ...	111
Abb. 4.2:	Koordinatenzeitreihe der Referenzstation IF1A für einen Zeitraum von etwas ...	114
Abb. 4.3:	Zusammenhang zwischen der Bewegung eines Punktes P auf einer Platte und ...	116
Abb. 4.4:	Finites Dreieckselement mit den Dislokationsvektoren und seiner neuen ...	118
Abb. 4.5:	Punktfeld aus HEIDBACH [2000] zur Interpolation mit finiten Elementen.	119
Abb. 4.6:	Vermaschung des Stützpunktfeldes zu finiten Dreieckselementen.	119
Abb. 4.7:	Interpolation über finite Elemente im Vergleich zur Starrkörperbewegung.	119
Abb. 4.8:	Darstellung der saisonalen Amplituden a_h in radialer Richtung mit jährlicher ...	124
Abb. 4.9:	Darstellung der Druckauflastkoeffizienten γ_p für Stationen des EUREF ...	124
Abb. 4.10:	Positionszeitreihe für die EUREF Station Euskirchen (EUSK), aus der die ...	126
Abb. 4.11:	Nach der Zeitreihenanalyse verbleibende Verbesserungen. Es wird deutlich, ...	126
Abb. 4.12:	Koordinatenzeitreihe für die EUREF Station Mallorca (MALL) mit einem ...	127
Abb. 4.13:	Darstellung der Horizontalpositionen für die Station Mallorca (MALL) mit ...	127
Abb. 4.14:	Erdbebenaktivität im Bereich der IGS Station Manzanillo (MANZ), die sich ...	128
Abb. 4.15:	Darstellung der Entwicklung der Punktkoordinaten der IGS-Station MANZ im ...	128
Abb. 5.1:	Statistische Verteilung der doppelten Differenzen für die Messungen auf L1 ...	133
Abb. 5.2:	Empirisch ermittelte Verteilung der Diskrepanzen zwischen den gemessenen ...	134
Abb. 5.3:	Empirisch ermittelte Verteilung der Diskrepanzen zwischen den gemessenen ...	135
Abb. 5.4:	Grafische Darstellung der Präzision (Standardabweichung aus den ...	141
Abb. 5.5:	Histogramme der Verbesserungen ausgewählter Positionierungsexperimente.	144
Abb. 5.6:	Darstellung ausgewählter Verteilungsfunktionen für die Höhenkomponente.	146
Abb. 5.7:	Auswirkung der abgeschätzten systematischen Fehler in der Troposphäre.	147

Abb. 5.8:	Auswirkung der abgeschätzten systematischen Fehler in der Ionosphäre.	147
Abb. 5.9:	Auswirkung der abgeschätzten systematischen Fehler in der Troposphäre.	148
Abb. 5.10:	Auswirkung der abgeschätzten systematischen Fehler in der Ionosphäre.	148
Abb. 5.11:	Systematische Fehlerwirkung auf die Positionsbestimmung durch Troposphäre ...	149
Abb. 6.1:	Die Kartenskizze zeigt die Insel Menorca sowie den östlichen Teil Mallorcas. ...	153
Abb. 6.2:	Große Fasstonne FTB2 im Einsatz vor Menorca. Die links abgebildete ...	155
Abb. 6.3:	Blick in die Steuerungs- und Aufzeichnungseinheit der Bojen: Oben rechts im ...	156
Abb. 6.4:	Drucksensor zur Messung der Bojen-Eintauchtiefe (links) und kapazitiver, ...	157
Abb. 6.5:	Gelände der Referenzstation in der Nähe der Stadt Ciutadella mit den ...	158
Abb. 6.6:	Vergleich der ermittelten kinematischen Positionslösungen ...	160
Abb. 6.7:	Genutzte Bojenposition bei Menorca (grün) und zusätzliche nutzbare ...	161
Abb. 6.8:	Netzbild der für die Experimente über lange Basislinien benutzten Stationen. ...	162
Abb. 6.9:	Zeitreihenanalyse für die Abweichungen von der Referenzlösungen an den ...	165
Abb. 6.10:	Verarbeitungskette der verschiedenen Sensor-Daten zur Ableitung der ...	166
Abb. 6.11:	Gegenüberstellung der einzelnen Meereshöhenbestimmungen für ...	167
Abb. 7.1:	Ansichten des Forschungsschiffs »Alkor«. Das Foto auf der rechten Seite zeigt ...	171
Abb. 7.2:	Ölauffangschiff »Bottsand«. Der GPS-Empfänger wurde dauerhaft für einen ...	171
Abb. 7.3:	Vergleich der Wasserdampfbestimmungen aus den einzelnen Experimenten. ...	173
Abb. 7.4:	Vergleich der Schätzungen für den integrierten Wasserdampfgehalt im Juni ...	173

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1:	Originäre und über GPS abgeleitete Beobachtungsgrößen, die für die Vor- bzw. ...	23
Tab. 2.2:	Charakteristische Eigenschaften der ursprünglichen Trägerphasen und ...	26
Tab. 2.3:	Protokoll-Auszug über die geometriefreie Bestimmung der Mehrdeutigkeiten ...	47
Tab. 3.1:	Übersicht über die angesprochenen Fehlerquellen, unterteilt in Unsicherheiten, ...	55
Tab. 3.2:	Trägerphasen-Rauschen gemäß Untersuchungen von BONA [2000], sortiert ...	60
Tab. 3.3:	Von BONA [2000] festgestellte Kreuzkorrelationen zwischen L_1 und L_2 sowie ...	60
Tab. 3.4:	Differenzen L_1-L_2 [mm] zwischen den Phasenzentren der im Rahmen dieser ...	64
Tab. 3.5:	Minimale und maximale Korrekturwerte (ohne Vorzeichen) aus relativen ...	65
Tab. 3.6:	Beschreibung der Parameter für die funktionale Modellierung der VTEC- ...	82
Tab. 3.7:	Koeffizienten a_{ij} der Abbildungsfunktionen MENDES A und MENDES B.	107
Tab. 3.8:	Fehlerquellen bzw. Korrekturen in der präzisen Analyse von GPS-Daten und ...	107
Tab. 4.1:	Gegenüberstellung der Begriffe »Reference System« und »Reference Frame« nach ...	112
Tab. 4.2:	Allgemeines Plattenkinematisches Modell APKIM 2000 aus geodätischen Daten ...	117
Tab. 4.3:	Ursachen für saisonale Variationen in den Zeitreihen von GPS-Koordinaten und ...	123
Tab. 4.4:	Amplituden a der jährlichen Schwingung sowie Druckauflastkoeffizienten γ für ...	125
Tab. 5.1:	Darstellung der wesentlichen statistischen Kenngrößen der Datensätze. Die ...	133
Tab. 5.2:	Darstellung der wesentlichen statistischen Kenngrößen für die ...	137
Tab. 5.3:	Darstellung der statistischen Kenngrößen für die Genauigkeitsanalyse der ...	137
Tab. 5.4:	Ergebnisse statischer Positionierungen über die sehr kurze Basislinie IF1A-6204.	138
Tab. 5.5:	Kinematische Positionslösung aus der Blockausgleichung im Vergleich zur ...	139
Tab. 5.6:	Kinematische Positionslösungen über kurze, mittlere und lange Basislinien im ...	140
Tab. 5.7:	Darstellung der Kenngrößen für die Betrachtung der Verbesserungen ...	143
Tab. 5.8:	Darstellung ausgewählter Kenngrößen für die Betrachtung der Höhenverteilungen.	145
Tab. 6.1:	Ergebnisse der kinematischen Bojenpositionierung über die weit entfernten ...	162
Tab. 6.2:	Übersicht bzgl. der kinematischen Höhenbestimmung der Forschungsboje FTB2 ...	163
Tab. 6.3:	Ergebnisse aus der Zeitreihenanalyse für ausgewählte Experimente ...	164
Tab. 7.1:	Ergebnisse der ersten Alkor-Fahrt im Juni 2001. Die Nummer des Experimentes ...	172

Abkürzungsverzeichnis

AIM	Annual Ionosphere Model
AFx	Ambiguity Fix
APKIM	Allgemeines Plattenkinematisches Modell
BLUE	Best Linear Unbiased Estimator
BOC	Binary Offset Carrier
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CMC	Code-Minus-Carrier (Kombination von Strecken- und Trägerphasenmessungen)
CME	Common Mode Error
CROP	Cross-Over Point
CS	Commercial Services
DGPS	differentielles GPS
DORIS	Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite
DoY	Day of Year
ETRS	European Terrestrial Reference System
ETRF	European Terrestrial Reference Frame
EUREF	European Reference Frame
ELRA	Elastic Lithosphere, Relaxing Asthenosphere
[F]	feucht
FP	Sub-Punkt für die feuchte troposphärische Laufzeitverzögerung
GPS	Global Positioning System
GTN	Global Tropospheric Navigation (Model)
[H]	hydrostatisch
HP	hydrostatischer Sub-Punkt
ID	Identifizierungsnummer
HRC	High Resolution Correlator
IERS	International Earth Rotation Service
IGS	International GPS Service
INS	inertiales Navigationssystem
IP	ionosphärischer Sub-Punkt
IQR	Inter-Quartile Range
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
IWV	Integrated Water Vapour
LAMBDA	Least-Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment
L_1	primäre Trägerwelle
L_2	sekundäre Trägerwelle
L_N	Narrow Lane Linearkombination
L_W	Wide Lane Linearkombination
L_{LK}	Linearkombination (allgemein)
LK	Linearkombination
LLRA	Local Lithosphere, Relaxing Asthenosphere
MEO	Medium Earth Orbit
[N]	Nordrichtung
[NEU]	neutral
NGS	National Geodetic Service
NNR	No Net Rotation
[O]	Ostrichtung
OS	Open Service
PDGPS	Phasen-Differentielles GPS
PRS	Public Regulated Service
SAR	Search and Rescue
SGVE	Self-Gravitating Viscoelastic Multi-Layer Model
SINEX	Solution Independent Exchange Format
SLR	Satellite Laser Ranging
SNR	Signal-to-Noise Ratio

SoL	Safety-of-Life
TEC	Total Electron Content
VTEC	Vertical Total Electron Content
WGS	World Geodetic System
ZWD	Zenith Wet Delay

Symbolverzeichnis

a	Amplitude
$a_i; a_2$	Verstärkungsfaktoren für die Bildung einer Linearkombination (LK) aus Messungen auf L_1 und L_2
α	Irrtumswahrscheinlichkeit
A	Ambiguity Function
\underline{A}	Modellmatrix, Designmatrix
B	Signal-Rausch-Verhältnis
δb	Bias; systematischer Fehler, z.B. Laufzeitverzögerung durch Empfänger-Hardware
β_T	Abnahmerate der Temperatur
c	Lichtgeschwindigkeit <i>auch:</i> Amplitude von Cosinustermen <i>auch:</i> Platzhalter für eine Konstante (Ionosphäre)
C	Auto-Kovarianzfunktion <i>auch:</i> Konstante 1. Ordnung (Ionosphäre)
\underline{C}	Rotationsmatrix
D	Doppler-Messung
δ	nicht korrelierend wirkender Fehler
Δ	Ausreißer <i>auch:</i> systematischer Fehler <i>auch:</i> Differenz, Abweichung
e	partieller Wasserdampfdruck
\underline{e}_i	Einheitsvektor mit dem Wert 1,0 in Zeile i
ε	Verzerrung <i>auch:</i> zufällige Abweichung
$E\{\}$	Erwartungswert von $\{\dots\}$
E	Ostwert, Rechtswert (Koordinate)
\underline{E}	Einheitsmatrix
f	Anzahl der statistischen Freiheitsgrade <i>auch:</i> Frequenz <i>auch:</i> Skalierungsfaktor für Partialtiden bei ozeanischen Auflasten <i>auch:</i> Abplattung eines Ellipsoids <i>auch:</i> Wahrscheinlichkeits-Dichtefunktion
f/n	Bedingungsichte; Verhältnis der statistischen Freiheitsgrade zu der Anzahl der Beobachtungen
f_{L1}	Frequenz der Trägerwelle L_1
F	Verteilungsfunktion der Normalverteilung <i>auch:</i> Gezeitenwellen-Koeffizient
φ	Funktion, Beobachtungsgleichung <i>auch:</i> ellipsoidische (geografische) Breite
φ^*	geozentrische Breite
$\phi_{A,L1,k}^i$	Trägerphasenmessung auf L_1 von GPS-Empfänger auf Station A zu Satellit i in der Epoche k ; grundsätzlich in Phasenzyklen
ϕ	Querneigung, Rollwinkel, Hängewinkel
$\nabla\Delta\phi_{AB,k}^{ij}$	doppelte Differenz der Trägerphasenmessungen zu Referenzsatellit i und Sekundärsatellit j über die Basislinie A, B zur Epoche k ; grundsätzlich in Phasenzyklen
$\delta\nabla\Delta\phi_{AB,k-t,k}^{ij}$	dreifache Differenz der Trägerphasenmessungen, hervorgegangen aus der Subtraktion der entsprechenden doppelten Differenzen zu den Epochen k und $k-1$
$\delta\phi_{A,k}^i$	Korrekturen für die Trägerphasenmessungen auf Station A zu Satellit i zur Epoche k ; grundsätzlich in Einheiten von Phasenzyklen
$\nabla\delta\phi_{AB,k}^{ij}$	doppelte Differenz der Trägerphasenkorrekturen; siehe auch $\nabla\Delta\phi_{AB,k}^{ij}$
g	Schwerebeschleunigung
γ	stochastisch korrelierender Fehler
γ_p	linearer Druckgradient
G	Gezeitenwellen-Koeffizient

	<i>auch</i> : horizontaler Gradient (troposphärische Laufzeitverzögerung)
GM	Gravitations-Massenprodukt (Erde)
Ion_{LK}	ionosphärische Laufzeitverzögerung mit Bezug auf die Linearkombination LK in metrischen Einheiten, vereinfachte Schreibweise für $\delta S_{A,LK,lon,k}^i$
h	ellipsoidische Höhe
H	orthometrische Höhe (Höhe »über dem Meeresspiel«)
k	Laufindex <i>auch</i> : Refraktionskonstante <i>auch</i> : Anzahl der Stichprobenwerte
\underline{K}	Verstärkungsmatrix
\underline{L}	Gleichung
$\underline{\underline{L}}$	Beobachtungsvektor
$\underline{\underline{L}}_0$	Vektor der genäherten Beobachtungen
$\underline{\Delta \underline{L}}$	Vektor der gekürzten Beobachtungen bzw. der Innovationen
\underline{L}_Δ	Vektor der systematischen Fehler in den Beobachtungen
λ	geografische Länge <i>auch</i> : Wellenlänge einer Struktur <i>auch</i> : Abnahmerate des Wasserdampfdrucks (»Water Vapour Lapse Rate«)
λ_{L_i}	Wellenlänge der Trägerwelle auf L_i
m	Anzahl der Werte der Auto-Kovarianzfunktion <i>auch</i> : Wert einer Mapping Funktion (Abbildungsfunktion)
M_T	Molmasse von trockener Luft
n	Anzahl der Beobachtungen bzw. Messwerte <i>auch</i> : Brechungsindex
n_{EFF}	effektive Messwertanzahl
N_E	Elektronendichte
N	Nordwert, Hochwert (Koordinate) <i>auch</i> : Mehrdeutigkeit
\underline{N}	Normalgleichungsmatrix
N_{A,L_i}^i	Trägerphasen-Mehrdeutigkeit für Empfänger auf Station A zu Satellit i und Trägerwelle L_i
$\nabla \Delta N_{AB}^{ij}$	doppelte Differenz des Mehrdeutigkeitsterms; siehe auch $\nabla \Delta \phi_{AB,k}^{ij}$
θ	Längsneigung, Nickwinkel <i>auch</i> : Poldistanz
\underline{O}	Nullmatrix
p	Luftdruck
P	Wahrscheinlichkeit
q	Maßstabsfaktor, Konvertierungsfaktor <i>auch</i> : Skalierungshöhe (z. B. für die troposphärische Laufzeitverzögerung)
\underline{P}	Gewichtsmatrix (i. A. der Beobachtungen)
\underline{Q}_{LL}	Kofaktormatrix der Beobachtungen
\underline{Q}_{XX}	Kofaktormatrix der Unbekannten
\underline{Q}_{VV}	Kofaktormatrix der Verbesserungen
r	relative Häufigkeit
r_E	Radius (der Erde)
R	Auto-Korrelationsfunktion
R_0	universelle Gaskonstante
R_T	spezifische Gaskonstante der trockenen Luft
\underline{R}	Redundanzmatrix (enthält die Redundanzanteile auf ihrer Diagonale); <i>auch</i> : Rotationsmatrix <i>auch</i> : Ortsvektor (Koordinatenvektor)
ρ	Dichte <i>auch</i> : Korrelationskoeffizient
$\rho_{A,L_i,k}^i$	geometrische Entfernung zwischen L_i -Phasenzentrum der GPS-Antenne auf Station A und dem Satelliten i zur Epoche k

$\nabla\Delta\rho_{AB,k}^{ij}$	doppelte Differenz der geometrischen Entfernung, siehe auch $\nabla\Delta\phi_{AB,k}^{ij}$
s	empirische Standardabweichung <i>auch:</i> Amplitude von Sinustermen
s_{ε}	empirische Standardabweichung aus zufälligen Abweichungen, also aus Differenzen zwischen dem Referenzwert (wahrer Wert) und dem Messwert; quantifiziert die Genauigkeit
s_v	empirische Standardabweichung aus Verbesserungen; quantifiziert die Präzision
σ	theoretische Standardabweichung
σ_0	Standardabweichung der Gewichtseinheit (à priori)
s_0	Standardabweichung der Gewichtseinheit (à posteriori)
σ_a	Störbeschleunigung
σ_N	Prozessrauschen der Mehrdeutigkeiten
S	Entfernung
Δs	(sphärische) Entfernung
\underline{S}	Systemmatrix
$S_{A,L1,k}^i$	Streckenmessung auf Station A zu Satellit i zur Epoche k unter Nutzung des L_1 -Signals
δS	funktional zu modellierende Fehlergröße
$\delta S_{A,L1,ion,k}^i$	ionosphärische Laufzeitverzögerung zwischen GPS-Antenne auf Station A zum Satelliten i zur Epoche k , gültig für das L_1 -Signal
$\delta S_{A,Trop,k}^i$	troposphärische Laufzeitverzögerung zwischen GPS-Antenne auf Station A zum Satelliten i zur Epoche k
$\delta S_{A,RTrop}^{z=0}$	residuelle troposphärische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung auf Station A
$\underline{\Sigma}_{LL}$	Kovarianzmatrix der Beobachtungen
$\underline{\Sigma}_{XX}$	Kovarianzmatrix der Unbekannten
$\delta t_{A,k}$	Uhrfehler des GPS-Empfänger auf Station A zur Epoche k
δt_k^i	Uhrfehler des GPS-Satelliten i zur Epoche k
T	Temperatur
T_M	mittlere Temperatur der Troposphäre (zum Wasserdampfdruck gewichtet)
\underline{T}	Transitionsmatrix
t_f	Quantil der t -Verteilung für f statistische Freiheitsgrade bzw. entsprechende Testgröße
t	Zeit, Epoche <i>auch:</i> Translation
t_D	Tag des Jahres (0 bis 364 bzw. 365)
Δt_W	Tag des »maximalen Winters« (kältester Tag im meteorologischen Sinne)
TEC	Elektroneninhalt in Projektionsrichtung zum Satelliten
τ	Zeitinkrement
τ_R	Relaxationszeit
u	Anzahl der Unbekannten <i>auch:</i> Skalierungsfaktor für Partialtiden bei ozeanischen Auflasten
δUT_1	Zeitkorrektur für UT1 (Weltzeit), Bestandteil der Erdorientierungsparameter
v	Verbesserung, Residuum <i>auch:</i> Geschwindigkeit
\underline{v}	Geschwindigkeitsvektor
V_{ion}	ionosphärischer Verstärkungsfaktor (Linearkombination)
$VTEC$	Elektroneninhalt in Zenitrichtung
ϑ	Phasenverschiebung
w	Testgröße <i>auch:</i> Faktor zur Definition von Mehrdeutigkeits-Suchintervallen <i>auch:</i> Aufwölbung <i>auch:</i> Gewicht
ω	Rotationsgeschwindigkeit
$\underline{\Omega}$	Rotationsvektor
\underline{X}	Positionsvektor
$\underline{\Delta X}$	Positions-differenzvektor

$\underline{X}_k^{i \leftarrow A}$	kartesischer Positionsvektor von GPS-Satellit i zur Epoche k , beobachtet von GPS-Empfänger auf Station A
$\delta \underline{X}_k^{i \leftarrow A}$	Korrekturvektor für die Positionen des Satelliten i , der vom GPS-Empfänger auf Station A zur Epoche k beobachtet wird
$\underline{X}_{A,Lt,k}$	kartesischer Positionsvektor des L_t -GPS-Antennenphasenzentrum auf Station A
$\delta \underline{X}_{A,k}$	Korrekturvektor für die Positionen der GPS-Antenne auf Station A zur Epoche k
\underline{X}	Vektor der Unbekannten (Parameter) bzw. Zustandsvektor
\underline{X}^p	prädizierter Zustandsvektor
\underline{X}_0	Vektor der Näherungsunbekannten
$\Delta \underline{x}$	Vektor der Zuschläge zu den Unbekannten (gekürzter Parametervektor)
$\Delta \underline{x}$	Vektor der Translationen (bei einer Transformation)
$X; x$	x -Komponente des Koordinatenvektors
\underline{x}_Δ	Vektor der systematischen Fehler in den Parametern (Unbekannten)
\dot{x}	Geschwindigkeit
\ddot{x}	Beschleunigung
χ	astronomische Argument
χ^2	Quantil der χ^2 -Verteilung
ξ	korrelierend wirkender Fehler
$Y; y$	y -Komponente des Koordinatenvektors
Y	Quantil der Normalverteilung
μ	wahrer Wert
	<i>auch:</i> Viskosität des Erdmantels
	<i>auch:</i> Reflexionskoeffizient
ψ	Azimut
	<i>auch:</i> Schiefe einer statistischen Verteilung
$Z; z$	z -Komponente des Koordinatenvektors
	<i>auch:</i> Zenitwinkel
	<i>auch:</i> Kompressibilität eines Gases
\underline{Z}	Transformationsmatrix

Publikationsliste (List of Publications)

In der nachfolgenden Übersicht findet der Leser Veröffentlichungen, die in Zusammenhang mit dieser Habilitationsschrift stehen. Die Mehrzahl der Aufsätze liegt in englischer Sprache vor.

The following overview is a list of relevant publications which are related to the contents of this habilitation thesis. Most of these papers were written in English.

SCHÜLER, T. [2006]; *Interpolating Reference Data - Kinematic Positioning Using Public GNSS Networks*; Inside GNSS - Engineering Solutions for the Global Navigation Satellite System Community, October 2006, Vol. 1, No. 7, www.inside.gnss, pp. 50-56; <http://forschung.unibw-muenchen.de/ainfo.php?&id=11212>

SCHÜLER, T. [2006]; *10 Hz or 10 s?*; GPS Solutions (2006), DOI 10.1007/s10291-006-0034-8, published online: see www.springerlink.com, Springer-Verlag, Heidelberg - Berlin, 2006

SCHÜLER, T. [2006]; *GNSS Meteorology on Moving Platforms*; Inside GNSS - Engineering Solutions for the Global Navigation Satellite System Community, April 2006, www.inside.gnss, pp. 20-23; <http://forschung.unibw-muenchen.de/ainfo.php?&id=9272>

KRUEGER, E., T. SCHÜLER, B. ARBESSER-RASTBURG [2005]; *The Standard Tropospheric Correction Model for the European Satellite Navigation System Galileo*; Proceedings of the XXVIIIth General Assembly of International Union of Radio Science (URSI), 23-29 October 2005, New Delhi, India; <http://forschung.unibw-muenchen.de/ainfo.php?&id=5865>

SCHÜLER, T. [2005]; *Precise Long-Baseline Kinematic GPS Positioning Considering the Impact of Systematic Errors*; GPS Solutions (2005), DOI 10.1007/s10291-005-0012-6, 18 pages, published online: see www.springerlink.com, Springer-Verlag, Heidelberg - Berlin, 2005; <http://forschung.unibw-muenchen.de/ainfo.php?&id=5752>

SCHÜLER, T. [2005]; *Long-Baseline Kinematic GPS Data Analysis for ENVISAT Radar Altimeter Calibration*; Artificial Satellites, Journal of Planetary Geodesy, Warszawa, manuscript, Vol. 40, No. 3, pp. 173-184, 2005; <http://forschung.unibw-muenchen.de/ainfo.php?&id=5762>

SCHÜLER, T., E. KRUEGER [2005]; *Atlas of GPS-Based Water Vapour Estimation in The Baltic Sea, Results of the experiments on board Research Vessel "Alkor" and Oil Recovery Vessel "Bottsand" carried out within the scope of project "Measurement of Water Vapour Contents by Techniques of Existing and Future Global Navigation Satellite Systems (GNSS) as Contribution to the Development and Validation of a Coupled Model of the Baltic Region"*; Report, Project BALTIMOS, Institute of Geodesy and Navigation, University FAF Munich, Germany, 2004; <http://forschung.unibw-muenchen.de/ainfo.php?&id=5775>

SCHÜLER, T., G. W. HEIN [2005]; *ENVISAT Radar Altimeter Calibration with High-Sea GPS Buoys*; Proceedings of the 2004 ENVISAT & ERS Symposium, 6-10 September 2004, Salzburg, Austria, ESA Publications Division (EPD), Special Publication SP-572, April 2005, 10 pages; <http://forschung.unibw-muenchen.de/ainfo.php?&id=5301>

SCHÜLER, T. [2004]; *Ein Beitrag zur Kalibrierung des ENVISAT-Radaraltimeters mit Hilfe von GPS-Hochseebojen*; Zeitschrift für Vermessungswesen, Wißner-Verlag, 128. Jahrgang, Nr. 5/2004; <http://forschung.unibw-muenchen.de/ainfo.php?&id=5163>

KRUEGER, E., T. SCHÜLER, G.W. HEIN, A. MARTELLUCCI, G. BLARZINO [2005]; *Galileo Tropospheric Correction Approaches developed within GSTB-V1*; GNSS 2004 - European Navigation Conference, 17-19 May 2004, Rotterdam, The Netherlands; <http://forschung.unibw-muenchen.de/ainfo.php?&id=5240>

1. Einführung

1.1 Kinematische Positionsbestimmung

Bereits vor der Erklärung der vollen operationellen Betriebsfähigkeit des amerikanischen globalen Positionierungssystems GPS, die erst im Jahre 1994 offiziell deklariert wurde, erfolgte seine Nutzung für wissenschaftliche Anwendungen. Zunächst stand der Einsatz für die statische Positionierung, bei der die GPS-Antenne nicht in Bewegung ist, im Vordergrund. Ein typisches Beispiel kann in der Errichtung des Internationalen GPS Dienstes IGS gesehen werden¹, dessen Hauptanliegen der Aufbau eines globalen Netzwerkes von Referenzstationen ist, um ein exaktes Referenzsystem zu definieren und andere Satellitenmissionen zu unterstützen, hochpräzise Orbitdaten der GPS-Satelliten abzuleiten und geodynamische Vorgänge zu beobachten².

Schnell wurde aber auch das hohe Potenzial für die kinematische Positionsbestimmung erkannt. Im nicht-wissenschaftlichen Bereich stellt dieses Anwendungsspektrum den klaren Hauptanteil dar, denn GPS wurde als System zur Ortung und Navigation von (originär militärischen) Flugkörpern, Fahrzeugen und Personen entwickelt, deren Position variabel ist. Charakteristisch für eine Reihe wissenschaftlicher Anwendungen, aus denen im Rahmen dieser Arbeit zwei exemplarisch herausgegriffen werden, sind hohe Genauigkeitsforderungen. Beispielsweise gelingt bei der Flugzeuggestützten Schwerefelderkundung erst seit der Verwendung von GPS-Sensoren eine ausreichend genaue Separierung von kinematischen und gravitativen Beschleunigungskomponenten. Dennoch stellt das im Vergleich zum Gravimeter hohe Rauschniveau der GPS-Ergebnisse immer noch eine maßgebliche Limitierung dieses Verfahrens dar, das auf Grund vorzunehmender Glättung der Daten die räumliche Auflösung der Schwereaufnahme zwangsläufig reduziert³.

Für viele andere Applikationen reicht die Präzision der Phasenmessungen grundsätzlich aus. Aus technischer Sicht kann der bisher erreichte Stand bzgl. des Phasenrauschens, das bei gängigen Geräten deutlich im Submillimeter-Bereich zu sehen ist⁴, durchaus als sehr positiv bezeichnet werden. Das Hauptproblem bei der präzisen kinematischen Positionsbestimmung liegt vielmehr in der Tatsache, dass Phasenmessungen eine Mehrdeutigkeit aufweisen, die zunächst gelöst werden muss, bevor anschließend eine hochgenaue Trilateration unter Kenntnis ausreichend genauer Satellitenpositionen durchgeführt werden kann. Hier erweist sich die Anzahl der üblicherweise verfügbaren Satelliten als ein begrenzender Faktor: Die Erfolgsrate gängiger Verfahren zur Mehrdeutigkeitslösung steigt mit zunehmender Satellitenzahl, doch bestehen bei kinematischen Anwendungen häufig Sichthindernisse, so dass nicht alle theoretisch verfügbaren Satelliten nutzbar sind. Abhilfe schafft neben der Sensorintegration, z. B. mit inertialen Navigationssystemen (INS), die nicht Gegenstand dieser Arbeit sein sollen, der Aufbau des europäischen GALILEO Systems⁵.

Neben den bisher angesprochenen geometrischen Problemen tritt mit zunehmender Entfernung von den Referenzstationen die atmosphärische Refraktion als Störfaktor in Erscheinung, der nicht nur die Genauigkeit herabsetzt, sondern auch die Festsetzung der Mehrdeutigkeiten auf ihren Ganzzahlwert erschweren bzw. verhindern kann. Geeignete Korrekturmodelle sind aus diesem Grunde von hoher Bedeutung, wenn die kinematische Positionierung auch über größere Entfernungen durchzuführen ist.⁶ Mehrwege-Effekte wirken hingegen ohne Abhängigkeit von der Entfernung und resultieren aus Reflexionen des originären Satellitensignals, das so auf Umwegen zur Nutzerantenne findet und sich mit dem direkten Signal überlagert. Im Nahbereich kann diese Fehlerquelle als dominant bezeichnet werden.

¹ siehe <http://igsch.jpl.nasa.gov/network/netindex.html> (Januar 2005)

² Insofern wird bereits der Begriff der Unbeweglichkeit relativiert: Zwar folgen die Auswertemethoden der GPS-Analyse statischen Prinzipien, da im Allgemeinen nur Tagesdatensätze ausgewertet werden und dabei die Stationskoordinaten grundsätzlich als invariabel betrachtet werden dürfen. Im strengen Sinne bewegt sich jedoch auch eine GPS-Referenzstation (zumindest relativ zu einem globalen Referenzsystem) auf Grund platten-tektonischer Bewegungen und anderer Effekte (z.B. der Gezeitenwirkung); siehe auch Kapitel 4.

³ siehe z. B. KREYE, ZIMMERMANN, HEIN [2004]

⁴ siehe auch Abschnitt 3.3.1 sowie auch Abschnitte 5.1 und 5.2

⁵ siehe Kapitel 8 zu den Innovationen in der Satellitennavigation

⁶ siehe Kapitel 3 zur Fehlermodellierung

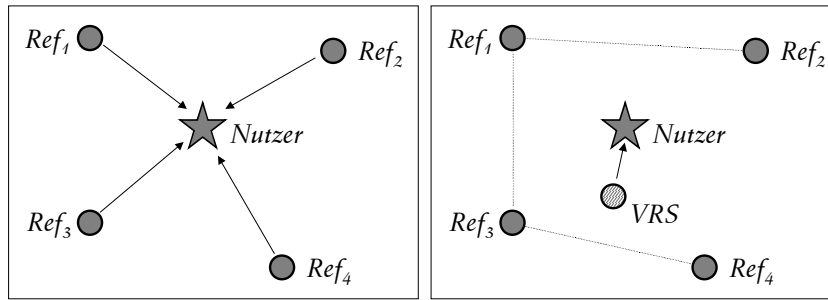


Abbildung 1.1: Vereinfachte Darstellung der wesentlichen Konzepte zur präzisen kinematischen Positionsbestimmung (links: Basislinien-Positionierung; rechts: aktives Referenzstationsnetzwerk).

1.2 Konzepte und eigener Lösungsansatz

Die verschiedenen Lösungsansätze zur GPS-basierten kinematischen Positionierung variieren zwar in ihren Details, lassen sich aber in aller Regel auf zwei Grundtypen zurückführen, die in Abbildung 1.1 skizziert werden:

a) Basislinien-Methode:

Dieser Ansatz (linker Bildteil) kann als klassisches Konzept der kinematischen Positionsbestimmung bezeichnet werden. Im einfachsten Fall erfolgt die Koordinierung des sich bewegenden Nutzers (Rover) durch Anbindung an eine einzige Referenzstation. Dabei werden die Trägerphasenmessungen dieser festen Station mit jenen des Rovers kombiniert, zumeist in Form doppelter Differenzen⁷, die zur Elimination der Empfänger- und Satellitenuhrfehler sowie auf ganzzahlige Mehrdeutigkeitsterme führen. Befindet sich die Referenzstation in der Nähe des Rovers, so werden viele räumlich korrelierende Fehlereinflüsse wirksam eliminiert. Zwar beschränkten sich verschiedene Auswerteprogramme in der Anfangszeit des GPS auf die Prozessierung einzelner Basislinien, doch ist diese Einschränkung obsolet, und heutige Software kann auch ein gesamtes Netzwerk von Referenzstationen in die Auswertung einbeziehen. Die unterschiedlichen Entfernungen zum Nutzer führen dabei zwar zu unterschiedlich starken Fehlereinflüssen über die einzelnen Basislinien, doch können diese durch Aufstellung eines stochastischen Modells berücksichtigt werden⁸.

b) Virtuelle Referenzstation:

Die zweite, neuere Methode nutzt die Vorteile eines Netzwerkes von Referenzstationen aus, um aus deren GPS-Daten Korrekturen abzuleiten. Wesentliche Motivation zur Entwicklung dieses Ansatzes war die Ausdehnung des Aktionsradius von präzisen kinematischen GPS-Anwendungen. Wenn nämlich mindestens 3 Referenzstationen eine Fläche aufspannen und sich die Nutzerposition innerhalb dieses Dreiecks befindet, so können Flächenkorrekturparameter abgeleitet werden, die eine Interpolation der systematischen Fehler für die Nutzer erlauben. Dieser Ansatz basiert also nicht mehr auf der Elimination von Störeinflüssen, sondern auf deren Quantifizierung. Werden nun diese Flächenkorrekturparameter sowie die Messdaten (ggf. nur die der nächstgelegenen Station) an den Nutzer übermittelt, so können dort die Korrekturen berechnet und an die Messungen angebracht werden. Die Auswertemethodik entspricht damit konzeptionell bereits wieder der Methode (a), denn es handelt sich um eine reine Basislinien-Auswertung, nur dass zusätzlich Korrekturwerte aus Messungen auf

⁷ siehe Abschnitt 2.1.2

⁸ siehe Kapitel 3 für Details zu diesem Themenkomplex

den Referenzstationen ermittelt werden. Häufig wird jedoch in anderer Weise vorgegangen: An einem - prinzipiell willkürlich - definierten Punkt wird eine »virtuelle Referenzstation« (VRS) errichtet, deren Position sinnvoller Weise in unmittelbarer Nähe des Nutzers gewählt wird. An diesem Punkt werden »künstliche« GPS-Messdaten erzeugt, wobei die zuvor berechneten Flächenkorrekturen einfließen. Der Vorteil dieses Vorgehens besteht im Wesentlichen in der Schaffung einer universellen Schnittstelle zum Rover, denn jeder Nutzer kann VRS-Daten verwenden, ohne Kenntnis von den zu Grunde liegenden Algorithmen zu besitzen (bspw. bzgl. der Handhabung der Flächenkorrekturparameter). Außerdem kann weiterhin eine einfache kinematische Kurzbasislinien-Software verwendet werden, die bei der Prozessierung langer Basislinien möglicherweise versagen würde (z.B. weil die durch Gezeiteneinflüsse hervorgerufene Deformation der Erdkruste vernachlässigt wird).

1.2.1 Eigener Lösungsansatz

Konzept (b) besitzt das Potential, die kinematische Positionierung über größere Distanzen erfolgreich durchzuführen. Dieser Ansatz muss im Rahmen dieser Arbeit jedoch verworfen werden, da er für verschiedene wissenschaftliche Applikationen nicht verwendungsfähig ist. Aktive Referenznetzwerke existieren nur in hochentwickelten Gebieten. In anderen Regionen liegt eine flächenhafte Verteilung von Stationen mit ausreichender räumlicher Auflösung nicht vor, was nicht nur mit dem Entwicklungsstand zusammenhängen mag, sondern mit rein geografischen Faktoren. Ein Beispiel ist das Projekt zur Kalibrierung des ENVISAT Radar-Altimeters⁹, für das GPS-Bojen vor der Nordwestküste Menorcas ausgesetzt wurden. Eine flächenhafte Verteilung von Referenzstationen ist mangels der Verfügbarkeit von Festland- bzw. Inselregionen unmöglich.

Als Konsequenz aus dieser Erkenntnis muss das klassische Konzept (a), die Basislinien-Methode, verbessert werden. Abbildung 1.2 stellt die Vorgehensweise hierzu dar:

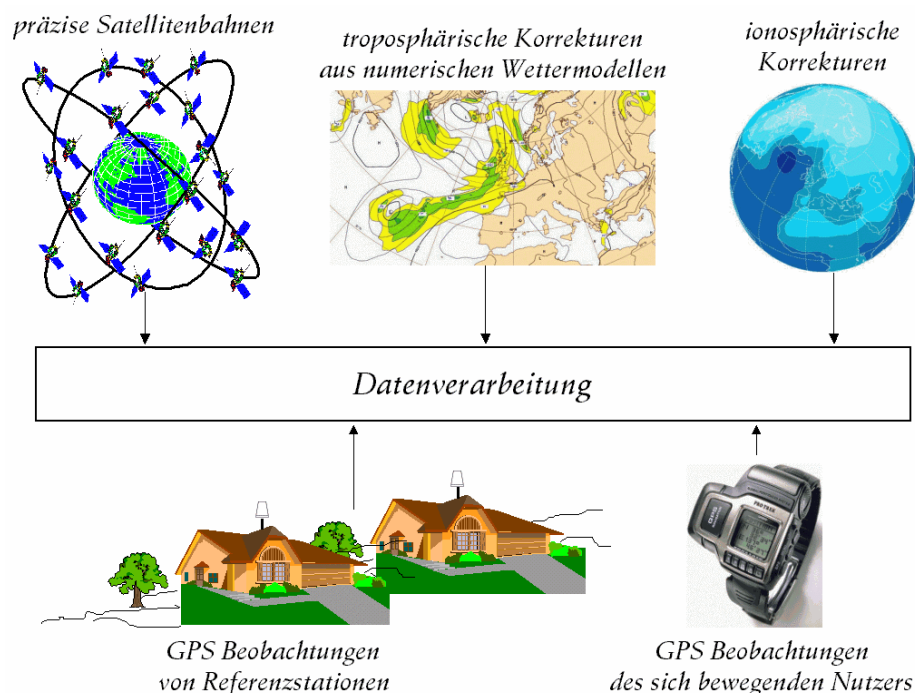


Abbildung 1.2: Konzept des gewählten Ansatzes zur kinematischen Positionierung unter Nutzung präziser GPS-Orbits und numerischer Wettermodelle sowie ionosphärischer Korrekturen.

⁹ siehe Kapitel 6

Im Gegensatz zu Konzept (b), das ein aktives Referenznetzwerk nutzt und aus GPS-Daten selbst die nötigen Korrekturen ableitet, werden bei dem in dieser Arbeit verwendeten Ansatz weitestgehend externe Informationen verarbeitet. So werden beispielsweise vom IGS sehr genaue Satellitenpositionen bestimmt. Diese Orbitprodukte sind frei verfügbar und reduzieren Orbitunsicherheiten so stark, dass sie kaum noch in der stochastischen Modellbildung berücksichtigt werden müssen. Weiterhin können numerische Wettermodelle zur Bestimmung troposphärischer Laufzeitverzögerungen benutzt werden¹⁰, deren Genauigkeit deutlich über den sonst üblicher Weise verwendeten Korrekturmodellen liegt¹¹. Als verbleibendes Problem stellt sich die Frage nach der Korrektur ionosphärischer Laufzeitverzögerungen¹². Verfügbar sind neben dem Klobuchar-Modell, das über die GPS-Broadcast-Message ausgestrahlt wird, jedoch nur über eine geringe Genauigkeit verfügt, die IONEX-Daten des IGS. Diese Ionosphären-Korrekturen sind gitterförmig angeordnet, jedoch mit Gitterweiten von $2,5^\circ$ (Breite) \times $5,0^\circ$ (Länge) für bestimmte Anwendungen sicherlich in ihrer Auflösung zu grob, so dass über weitere Korrekturmöglichkeiten nachgedacht werden muss. Die kinematische Positionierung wird auf diese Weise auch über längere Basislinien-Entfernungen möglich.

1.3 Struktur und Zielsetzung der Arbeit

Diese Arbeit versucht, den Stand der kinematischen GPS-Positionierung für wissenschaftliche Anwendungen herauszuarbeiten, wobei die Leistungsfähigkeit der Algorithmik primär nicht durch zeitliche Faktoren (Zeit bis zur Mehrdeutigkeitsfixierung), sondern durch eine Erhöhung der Distanzen zu den Referenzstationen beurteilt werden soll, was auf Grund eines ausgedünnten Netzes von Referenzstationen wesentliche wirtschaftliche Implikationen enthält. Der Aufbau wird in Abbildung 1.3 dargestellt.

Kapitel 2 führt in die Grundlagen der Koordinatenschätzung auf Basis von GPS-Messungen ein, wobei die Ausgleichung einer sequentiellen Kalman-Filterung gegenübergestellt und der Themenkomplex der Fixierung von Mehrdeutigkeiten angesprochen wird. In diesem Zusammenhang wird auch das Problem der - häufig nicht vorhandenen - stochastischen Unabhängigkeit von Messwerten adressiert. Zuverlässige Ergebnisse - gerade auch mit Bezug auf die Festsetzung der Mehrdeutigkeiten - können nur erzielt werden, wenn der Fehlermodellierung gebührende Aufmerksamkeit geschenkt

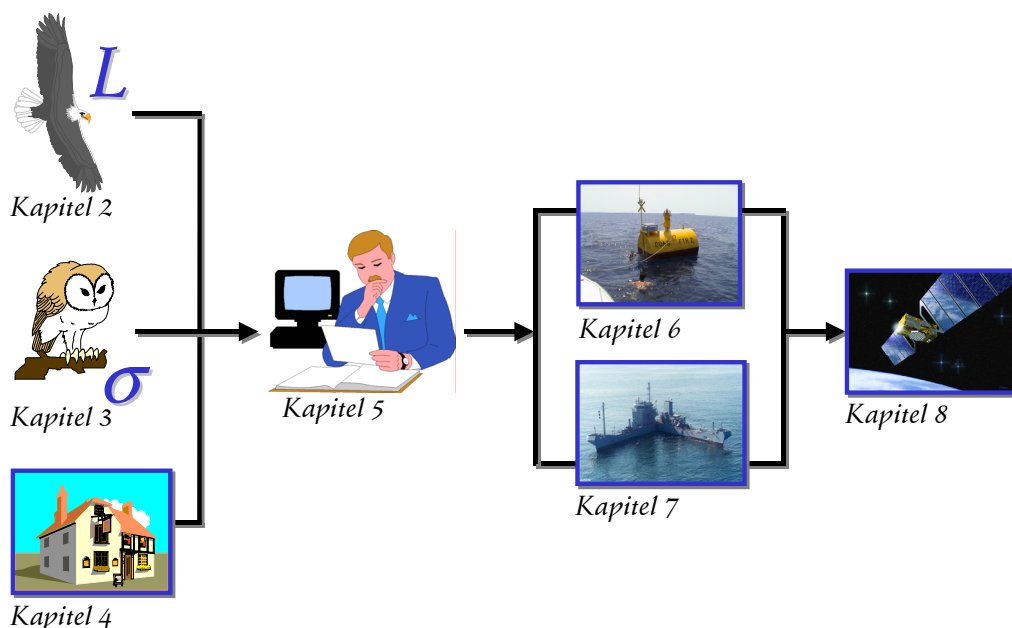


Abbildung 1.3: Aufbau der Arbeit »Zum Stand der kinematischen GPS-Positionsbestimmung«.

¹⁰ siehe bspw. SCHÜLER [2001] oder SCHÜLER, HEIN, EISSFELLER [2001]

¹¹ siehe dazu auch Abschnitt 3.4.9.2

¹² siehe dazu auch Abschnitt 3.4.9.1

wird. Diesem Thema widmet sich **Kapitel 3** ausführlich, da gegenwärtige Probleme bei der Nutzung kinematischer Auswertalgorithmen häufig auf Unzulänglichkeiten in dieser Hinsicht zurückzuführen sind, hier also ein erheblicher Innovationsbedarf festzustellen ist. Besonderes Augenmerk wird auf die atmosphärische Refraktion gelegt. In diesem Zusammenhang werden Trendfunktionen abgeleitet und räumliche Korrelationsfunktionen für das verbleibende stochastische Signal bestimmt. Jedoch wird nicht nur die funktionale Fehlermodellierung sowie die stochastische Modellbildung beschrieben, sondern es wird insbesondere auf die Fortpflanzung systematischer Fehler eingegangen, gegenüber denen die Verfahren zur Mehrdeutigkeits-Fixierung besonders sensitiv reagieren. Als wichtiger Beitrag folgt die Erweiterung bestehender Testverfahren um den Einfluss systematischer Fehler auf die Mehrdeutigkeiten. Damit soll zuverlässig erkennbar werden, ob eine Festsetzung grundsätzlich möglich ist oder nicht.

Kapitel 4 ist den Bezugssystemen bzw. der Veränderlichkeit und Stabilität der Koordinaten von Referenzstationen gewidmet, und es wird auf die zeitlichen Bewegungsfunktionen dieser Netzkpunkte eingegangen. Die Bedeutung wird nicht selten ebenfalls nur ungenügend beachtet, liegt aber auf der Hand, wenn bedacht wird, dass die Ergebnisse der kinematischen Positionierung häufig nicht nur in relativer Form (z.B. als Koordinatendifferenzen relativ zur nächsten Referenzstation), sondern als absolute Werte in einem bestimmten Bezugssystem gewünscht werden. So wurden im ENVISAT Radaraltimeter-Projekt genaue ellipsoidische Höhen des Meeresspiegels bezogen auf den ITRF gefordert. Als Konsequenz ist die Beobachtung des Verhaltens der verwendeten Referenzstationen sowie die Bereitstellung von aktuellen Positionen unumgänglich. In diesem Abschnitt der Arbeit werden neben saisonalen Variationskoeffizienten auch lineare Druckauflastgradienten für die EUREF-Stationen bezogen auf das ITRF aus den vorhandenen Wochenlösungen präsentiert, die zu einer Verbesserung der Koordinatenprädiktionen dienen können.

Schließlich werden in **Kapitel 5** die entwickelten Ansätze einem ersten praktischen Test unterzogen, wobei eine Untersuchung der zu Grunde liegenden statistischen Verteilung und die Interpolation von Referenzstations-Messungen, die häufig nur mit geringer zeitlicher Auflösung vorliegen, Gegenstand der Abhandlung sind. Diese Feststellungen sind auch für die Mehrdeutigkeits-Fixierung von Bedeutung, da die benutzten Algorithmen eine Normalverteilung der Daten voraussetzen.

Die Beschreibung konkreter Anwendungen und erzielter Ergebnisse erfolgt in **Kapitel 6** (Kalibrierung des ENVISAT Radar-Altimeters mit Hilfe von GPS-Bojen) sowie **Kapitel 7** (Wasserdampfbestimmung in der Ostsee). In erstgenanntem Abschnitt wird unter anderem nochmals eine Erhöhung der Basislinien-Längen vorgenommen, bei denen eine Festsetzung der Mehrdeutigkeiten nicht mehr in allen Fällen möglich ist. In diesem Zusammenhang interessiert dann insbesondere die Frage nach dem Genauigkeitspotential der Fließkomma-Lösungen für die kinematische Positionsbestimmung. Kapitel 7 beschreibt die Anwendung der entwickelten Auswertetechnik für eine besondere Anwendung: Aus den GPS-Messungen wird im kinematischen Modus neben den Koordinaten der Antenne auch troposphärische Laufzeitverzögerungen mitgeschätzt und in den integrierten Wasserdampfgehalt umgewandelt. Diese Größe ist für die Wettervorhersage und Klimamodellierung von Bedeutung. Der Einsatz des GPS auf Schiffen in der Ostsee schließt Datenlücken, da die Meeresgebiete gewöhnlich nur eine unzureichende Dichte von Messdaten aufweisen. Zu den vorgestellten Ergebnissen existieren nach dem Kenntnisstand des Autors keine vergleichbaren Veröffentlichungen in der Wissenschaft.

Abschließend wird in **Kapitel 8** das Erreichte zusammengefasst, wobei die Grenzen der kinematischen Positionierung mit dem gegenwärtigen globalen Navigationssystem GPS herausgestellt werden, um nachfolgend die zu erwartenden, einschneidenden Innovationen in der Satellitennavigation sowohl bzgl. der GPS-Modernisierung als auch bzgl. des Aufbaus des zukünftigen europäischen GALILEO Systems und deren Bedeutung zur Verbesserung der kinematischen Koordinatenbestimmung zu beleuchten.

1.4 Verwendete Software

Soweit nicht anders erwähnt, basieren die dargestellten Ergebnisse auf selbstentwickelter Software. Die verwendeten Module entstammen dem Programmpaket »PrePos GNSS Suite« (Precise Positioning GNSS Suite) und werden nachfolgend kurz zusammen mit ihrem Einsatzzweck benannt:

Statische Auswerteaufgaben übernahm dabei der »GNSS Troposphere and Coordinate Estimator - GTCE«, der auf das von SCHÜLER [2001] beschriebene Analysesystem TropAC zurückgeht. Die in Kapitel 4 vorgestellten Zeitreihenanalysen wurden mit dem »GTCE Base Studio« durchgeführt. Weiterhin erfolgte die in Abschnitt 3.4.2.3 vorgestellte Mehrweg-Analyse für die hauseigene Referenzstation IF1A durch Kombination von Strecken- und Phasenmessungen mit dem Modul »MupAS« (Multipath Analysis Software).

Die *kinematische Datenanalyse* wurde mit dem Modul »Semika« durchgeführt (Kapitel 5, 6 und 7). Weiterhin kam zur Interpolation von Referenzstationsdaten sowie zur Extraktion von Wettermodell-daten das Zusatzprogramm »RInter« (RINEX Data Interpolator and Tropospheric Delay Extractor) zum Einsatz, das mit dem Modul GATE (GNSS Data Editor)¹³ zur interaktiven Qualitätskontrolle der Daten gekoppelt ist.

¹³ Nicht zu verwechseln mit dem GALILEO Test-Bed „GATE“, das zur Zeit in Berchtesgaden (Bayern) eingerichtet wird.

2. Grundlagen der kinematischen Positionsbestimmung

Dieses Kapitel soll in straffer Form die allgemeinen Grundlagen bereitstellen, die zur kinematischen Bestimmung präziser Positionen und Geschwindigkeiten über GPS notwendig sind. Zunächst erfolgt eine Diskussion der verwendeten Beobachtungen, und die zugehörigen Beobachtungsgleichungen werden dargestellt. Anschließend werden die zwei typischen Verfahren der Parameterschätzung vorgestellt: Die Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadratsumme im Modell der »vermittelnden« Beobachtungen (GAUSS-MARKOV-Modell) lässt sich zur Lösung einer Vielzahl von Problemstellungen einsetzen. Weiterhin bietet die sequenzielle KALMAN-Filterung Vor- und Nachteile, die abschließend gegeneinander abgewogen werden. Es sei erwähnt, dass die Modellierung systematischer Effekte sowie die stochastische Behandlung von Einflussgrößen in den Themenkomplex »Fehlermodell« fällt und separat in Kapitel 3 behandelt wird.

2.1 Beobachtungen und Beobachtungsgleichungen

Verschiedene Beobachtungen werden während der kinematischen Analyse von GPS-Daten oder im Rahmen der Weiterverarbeitung der GPS-Ergebnisse verwendet. Tabelle 2.1 gibt eine Aufstellung der einzelnen in dieser Arbeit genutzten Größen und hebt ihren wesentlichen Verwendungszweck hervor.

In diesem Kapitel treten Beobachtungsgrößen, die lediglich für die Vorverarbeitung der GPS-Daten (namentlich die Doppler-Messungen) oder für spezielle Anwendungen der stochastischen Modellierung (das Signal-Rausch-Verhältnis) eine Rolle spielen, in den Hintergrund¹.

2.1.1 Strecken- und Trägerphasen-Messungen

Die Streckenmessungen weisen im Gegensatz zu den präziseren Trägerphasen keine Mehrdeutigkeiten auf² und werden daher zur Generierung von Näherungslösungen sowie zur Synchronisation der einzelnen Messungen benutzt. Die vereinfachte Beobachtungsgleichung für eine Messung auf einer Station A zum Satelliten i zur Epoche k bzgl. der Trägerwelle L_i lautet

Art	Beobachtung	Verwendungszweck
GPS originär	Streckenmessungen ³	Näherungslösungen für Positionen und Mehrdeutigkeiten; Synchronisation der Messungen
	Trägerphasen	präzise Punktbestimmung
	Doppler-Messungen	im Wesentlichen zur Erkennung von Phasensprüngen (Cycle Slips)
	Signal-Rausch-Verhältnisse	stochastische Modellierung zur Reduktion von Mehrwege-Effekten
über GPS abgeleitet	Koordinatenlösungen	bspw. als Eingangsgrößen zur Filterung von Trajektorien
	Geschwindigkeiten	Modellierung geodynamischer Vorgänge; Charakterisierung der Fahrzeugdynamik

Tabelle 2.1: Originäre und über GPS abgeleitete Beobachtungsgrößen, die für die Vor- bzw. Nachverarbeitung der Daten oder die Parameterschätzung in dieser Arbeit eine Rolle spielen.

¹ Diese Größen werden im Kapitel 4 im Zusammenhang mit der Daten-Vorverarbeitung bzw. der stochastischen Modellierung erläutert.

² Streng genommen weisen die C/A- und P-Kode-Messungen auch eine Mehrdeutigkeit auf. Dieses Problem hat bzgl. des P-Kodes keine praktische Relevanz, da er nach SEEGER [1989] eine Zykluslänge von 267 Tagen hat. Die Länge des C/A-Kodes liegt mit nur 1 ms deutlich unter jener des P-Kodes, doch kann diese Mehrdeutigkeit bei Kenntnis einer groben Näherungsposition recht schnell bestimmt werden.

³ Die Kode-Strecken werden häufig auch als »Pseudo-Strecken« (engl. »Pseudo-Ranges«) bezeichnet. Damit soll die systematische Verfälschung dieser Messungen um den Uhrfehler des Empfängers angedeutet werden, der jedoch durch doppelte Differenzbildung wirksam eliminiert wird. Der Begriffszusatz »Pseudo« wird an dieser Stelle deshalb nicht genutzt.

$$S_{A,L,t,k}^i + v = \rho_{A,L,t,k}^i + c \cdot (\delta t_{A,k} - \delta t_k^i) + \delta S_{A,L,t,lon,k}^i + \delta S_{A,Trop,k}^i \quad (2.1)$$

mit der geometrischen Distanz ρ , der Lichtgeschwindigkeit c , dem Uhrfehler des Empfängers (δt_A) und des Satelliten (δt^i) sowie der ionosphärischen (δS_{lon}) und troposphärischen Laufzeitverzögerungen (δS_{Trop}) und der Verbesserung v .

Die vereinfachte Gleichung für die Trägerphasen⁴ lässt sich in ähnlicher Art und Weise aufstellen

$$\phi_{A,L,t,k}^i + v = \frac{\rho_{A,L,t,k}^i + c \cdot (\delta t_{A,k} - \delta t_k^i) - \delta S_{A,L,t,lon,k}^i + \delta S_{A,Trop,k}^i}{\lambda_{L,t}} - N_{A,L,t}^i, \quad (2.2)$$

allerdings weist die ionosphärische Laufzeitverzögerung ein umgekehrtes Vorzeichen auf und der Mehrdeutigkeitsterm N muss hinzugefügt werden, der pro Empfänger, Satellit und Trägerwelle unabhängig von der Zeit konstant bleibt⁵, solange keine Phasensprünge auftreten.

2.1.1.1 Geometrische Distanz und Phasenzentrum der Antenne

Wie bereits in den beiden obigen Formeln angedeutet wird, bezeichnet die geometrische Distanz ρ die Strecke zwischen den Positionsvektoren der Phasenzentren der Antennen von GPS-Satellit⁶ (\underline{X}^i) und GPS-Empfänger (\underline{X}_A)

$$\rho_{A,L,t,k}^i = \left| \underline{X}_k^{i \leftarrow A} - \underline{X}_{A,L,t,k} \right| \quad (2.3)$$

Dabei ist die Position des Phasenzentrums grundsätzlich eine Funktion der Trägerfrequenz. Diese Abhängigkeit kann bzgl. der Satellitenpositionen vernachlässigt werden, nicht aber im Fall der Empfänger-Antenne, wo die Unterschiede zwischen L_1 und L_2 bei bestimmten Antennen im Bereich einiger Zentimeter liegen. Weiterhin existiert also

$$\rho_{A,L,2,k}^i = \left| \underline{X}_k^{i \leftarrow A} - \underline{X}_{A,L,2,k} \right| \quad (2.4)$$

und für das zukünftige dritte GPS-Signal (Trägerwelle L_5) müsste analog eine dritte Unterscheidung getroffen werden.

2.1.1.2 Allgemeine Formulierung

Die Beobachtungsgleichung für die Trägerphasen sei in allgemeiner Form nachfolgend gegeben

$$\phi_{A,k}^i + v = \lambda^{-1} \cdot \left(\left(\underline{X}_k^{i \leftarrow A} + \delta \underline{X}_k^{i \leftarrow A} \right) - \left(\underline{X}_{A,k} + \delta \underline{X}_{A,k} \right) \right) + \delta \phi_{A,k}^i - N_A^i, \quad (2.5)$$

wobei $\delta \underline{X}$ Korrekturen bzgl. der Positionen von Satellit (z. B. Exzentrizitäten) bzw. Empfänger (z. B. Gezeiten) bezeichnet und $\delta \phi$ jene bzgl. der Phasemessungen (z. B. atmosphärische Laufzeitverzögerungen; in Phasenzyklen). Die einzelnen Terme werden im Kapitel 3 (Fehlermodell) ausführlicher beschrieben. Das Thema »Mehrdeutigkeiten« (N) wird in Abschnitt 2.3 adressiert.

⁴ Die Trägerphase wird in dieser Darstellung grundsätzlich in Einheiten von Zyklen notiert. Zur Umrechnung in metrische Einheiten ist diese Größe mit der zugehörigen Wellenlänge λ zu multiplizieren.

⁵ In dieser ursprünglichen (also nicht-differenzierten) Form sind die ganzzahligen Mehrdeutigkeiten allerdings mit dem Phasenreststück vermischt und deshalb nicht als ganze Zahl schätzbar. Ganzzahligen Charakter erhalten die Mehrdeutigkeiten erst durch entsprechende Differenzbildung.

⁶ Durch das hochgestellte Symbol » $\leftarrow A$ « soll angedeutet werden, dass die Position des Satelliten i mit Bezug auf den Empfangszeitpunkt des Signals durch die Empfänger auf der Station A, B, \dots berechnet wurde. Da die Distanz zwischen dem Satelliten i und verschiedenen Empfängern unterschiedlich ist, sind die Abstrahlzeitpunkte jeweils verschieden, wenn sich die aufgezeichneten Beobachtungen der einzelnen Empfänger auf einen identischen Zeitpunkt beziehen (Synchronisationsforderung).

2.1.2 Doppelte Differenzen

Werden aus den einzelnen Beobachtungen auf den Stationen A und B zu einem primären Satelliten i (Referenzsatellit⁷) und einem sekundären Satellit j die Differenzen gebildet

$$\nabla\Delta\phi_{AB,k}^{ij} + v = (\phi_{B,k}^i - \phi_{A,k}^i) - (\phi_{B,k}^j - \phi_{A,k}^j) + v = \lambda^{-1} \cdot \nabla\Delta\rho_{AB,k}^{ij} + \nabla\Delta\delta\phi_{AB,k}^{ij} - \nabla\Delta N_{AB}^{ij} \quad , \quad (2.6)$$

so wird von »doppelten Differenzen« gesprochen⁸, die frei von Empfänger- und Satellitenuhrfehlern sind, sofern die einzelnen Messungen zuvor synchronisiert wurden⁹. Da die Korrekturterme ebenfalls nur noch als zweifache Differenzen in die Gleichung eingehen, kann auf einen verminderten Einfluss der einzelnen Fehlergrößen geschlossen werden, der mit geringer werdender Entfernung zwischen den Stationen A und B abnimmt. Aus diesem Grunde ist die kinematische Positionierung über kurze Basislinien besonders erfolversprechend¹⁰, während sich bei zunehmender Entfernung insbesondere die atmosphärische Refraktion störend bemerkbar macht. Der Mehrdeutigkeitsterm nimmt im Modell der doppelten Differenzen ganzzahligen Charakter an.

2.1.3 Dreifache Differenzen

Werden die doppelten Differenzen zweier aufeinanderfolgenden Epochen $k-1$ und k voneinander subtrahiert

$$\begin{aligned} \delta\nabla\Delta\phi_{AB,k-1,k}^{ij} + v &= \nabla\Delta\phi_{AB,k}^{ij} - \nabla\Delta\phi_{AB,k-1}^{ij} + v \\ &= [(\phi_{B,k}^i - \phi_{A,k}^i) - (\phi_{B,k}^j - \phi_{A,k}^j)] - [(\phi_{B,k-1}^i - \phi_{A,k-1}^i) - (\phi_{B,k-1}^j - \phi_{A,k-1}^j)] + v \quad , \\ &= \lambda^{-1} \cdot (\nabla\Delta\rho_{AB,k}^{ij} - \nabla\Delta\rho_{AB,k-1}^{ij}) + (\nabla\Delta\delta\phi_{A,k}^i - \nabla\Delta\delta\phi_{A,k-1}^i) \end{aligned} \quad (2.7)$$

so wird der Mehrdeutigkeitsterm eliminiert, wenn zwischen beiden Epochen kein Phasensprung aufgetreten ist. Diese »dreifache Differenz« (engl. *Triple Difference*) enthält im Vergleich zur »doppelten Differenz« noch stärker reduzierte Fehlerterme, da viele Einflussgrößen zwischen zwei unmittelbar aufeinander folgenden Messepochen eine sehr ähnliche Größenordnung aufweisen werden und auf Grund dieser stark positiven Korrelation wirksam verringert werden können. Allerdings müssen Einschränkungen bzgl. der Nutzbarkeit dieser abgeleiteten Beobachtung für die Positionsbestimmung hingenommen werden: Im Wesentlichen ist nur noch die Bestimmung der Koordinatendifferenz des sich bewegenden Empfängers zwischen Epoche k und $k-1$ möglich. Diese Beobachtung wird deshalb im Rahmen dieser Arbeit zur präzisen Geschwindigkeitsbestimmung verwendet. Über die Zeit integrierte Geschwindigkeiten können dann wiederum zur relativen Positionsbestimmung dienen.

2.1.4 Linearkombinationen

Werden Beobachtungen auf beiden Trägerfrequenzen (L_1 und L_2) beobachtet, so können lineare Kombinationen (LK) aus diesen Messungen gebildet werden

$$\nabla\Delta\phi_{AB,LK,k}^{ij} = a_1 \cdot \nabla\Delta\phi_{AB,L1,k}^{ij} - a_2 \cdot \nabla\Delta\phi_{AB,L2,k}^{ij} \quad , \quad (2.8)$$

⁷ Im Allgemeinen wird derjenige Satellit, der unter dem maximalen Elevationswinkel beobachtet wird, als Referenzsatellit ausgewählt.

⁸ Das Zeichen Δ symbolisiert dabei die Differenz zwischen den Messungen auf zwei Stationen zu einem identischen Satelliten und ∇ jene zwischen zwei Satelliten.

⁹ Auf Grund unterschiedlicher Empfängeruhrfehler beziehen sich die Messungen auf unterschiedliche Zeitpunkte und müssen nachträglich synchronisiert werden. Moderne Empfänger führen diese Synchronisation auf die GPS-Zeitskala selbständig mit ausreichender Genauigkeit durch, da sie ihren Uhrfehler ständig bestimmen und nachführen.

¹⁰ Die kinematische Punktbestimmung über Basislinien mit ca. 10 bis 20 km Entfernung kann im Allgemeinen als unkritisch bezeichnet werden, doch können bei längeren Basislinien unter schlechten Bedingungen - bspw. bei starker ionosphärischer Aktivität - bereits Probleme bzgl. der Mehrdeutigkeitsfestsetzung auftreten.

Signal	a_1	a_2	λ_{LK} [mm]	$\frac{Ion_{LK}}{Ion_{L1}}$	$\frac{\rho_{LK}}{\rho_{L1}}$	$\sigma_{\nabla\Delta S, LK}$ [m]	$\sigma_{\nabla\Delta\Phi, LK}$ [mm]	$\frac{\sigma_{\nabla\Delta\Phi, LK}}{\lambda_{LK}}$
L_1	1	0	190	1,000	1,00	0,12	0,9	0,5%
L_2	0	-1	244	1,647	0,78	0,25	1,7	0,7%
L_N	1	-1	107	1,283	1,78	0,13	0,9	0,8%
L_W	1	1	862	1,283	0,22	1,04	7,3	0,8%
$L_{2;1}$	2	1	156	0,587	1,22	0,25	1,8	1,2%
$L_{3;2}$	3	2	132	0,301	1,44	0,37	2,6	2,0%
$L_{4;3}$	4	3	114	0,090	1,66	0,45	3,2	2,8%
$L_{5;4}$	5	4	101	0,071	1,88	0,52	3,7	3,7%
$L_{9;7}$	9	7	54	0,005	3,55	0,49	3,5	6,5%
$L_{77;60}$	77	60	6	0,000	30,3	0,49	3,5	55,4%
$L_{60;77}$	60	77	∞	∞	0,000			
$L_{7;9}$	7	9	14653	350,35	0,013	149,70	1038,3	7,1%
$L_{4;5}$	4	5	1832	23,260	0,10	10,45	72,6	4,0%
$L_{3;4}$	3	4	1628	18,252	0,12	7,34	50,9	3,1%
$L_{2;3}$	2	3	564	5,479	0,34	1,87	12,9	2,3%
$L_{1;2}$	1	2	341	2,805	0,56	0,73	5,0	1,5%

Tabelle 2.2: Charakteristische Eigenschaften der ursprünglichen Trägerphasen und ausgewählter Linearkombinationen von L_1 und L_2 . Die Standardabweichungen für die originären Messungen lehnen sich an die Ergebnisse von BONA [2000] an und wurden mit 0,45 und 0,85 mm für Phasenmessungen auf L_1 bzw. L_2 festgesetzt (undifferenzierte Messungen) sowie auf 6,0 und 12,5 cm für die Strecken. (λ : Wellenlänge; σ : Standardabweichung; Ion_{LK}/Ion_{L1} : ionosphärischer Dämpfungsfaktor)

die bestimmte Eigenschaften in besonders ausgeprägter oder weniger ausgeprägter Form aufweisen werden, was von der Wahl der Verstärkungsfaktoren a_1 und a_2 abhängt. Tabelle 2.2 nennt die für diese Arbeit bedeutsamen Signale und ihre wesentlichen Eigenschaften⁴⁴. Das Verhältnis Ion_{LK}/Ion_{L1} gibt dabei an, in welchem Maße der Ionosphärenfehler gegenüber der Ausgangsmessung auf L_1 verstärkt oder abgeschwächt wird. Diese Aussage bezieht sich auf metrische Einheiten und steht mit dem oft benutzten ionosphärischen Verstärkungsfaktor V_{ion} im Verhältnis

$$\frac{Ion_{LK} [m]}{Ion_{L1} [m]} = \frac{f_{L1}}{f_{L2}} \cdot |V_{ion}| \quad \wedge \quad V_{ion} = \frac{a_1 \cdot f_{L2} - a_2 \cdot f_{L1}}{f_{LK}} \quad (2.9)$$

Das Verhältnis ρ_{LK}/ρ_{L1} charakterisiert die Auswirkung geometrischer Änderungen der Linearkombination im Vergleich zum Ausgangssignal auf L_1

$$\frac{\rho_{LK} [cyc]}{\rho_{L1} [cyc]} = \left| \frac{a_1 \cdot \frac{\rho}{\lambda_{L1}} - a_2 \cdot \frac{\rho}{\lambda_{L2}}}{\frac{\rho}{\lambda_{L1}}} \right| = \left| a_1 - a_2 \cdot \frac{f_{L2}}{f_{L1}} \right| \quad (2.10)$$

und basiert auf zyklischen Einheiten. Die angegebenen Standardabweichungen wurden über Fehlerfortpflanzung ermittelt, wobei für σ_{L1} und σ_{L2} das typische Empfängerrauschen gängiger Geräte am Markt angesetzt wurde und keine weiteren (äußeren) Einflüsse wie bspw. Mehrwege-Effekte Berücksichtigung finden.

Die Tabelle lässt drei Gruppen von Linearkombinationen erkennen (die originären Messungen auf L_1 und L_2 werden nicht gesondert klassifiziert), nämlich die »Spezialkombinationen« L_W (Wide Lane) und L_N (Narrow Lane), die sich bzgl. der Auswirkungen des Ionosphärenfehlers nicht vorteilhaft verhalten. Jedoch verfügt L_W über eine besonders große virtuelle Wellenlänge, was für die Mehrdeutigkeitslösung ausgenutzt wird. L_N spielt in diesem Zusammenhang die Rolle eines ergänzenden Signals, dessen

⁴⁴ siehe auch SEEGER [1989, 1993] sowie SCHÜLER [2001, S. 60f] für weitere Details

Mehrdeutigkeiten ebenso wie jene für L_W entweder gleichfalls gerade oder ungerade sein müssen - eine Randbedingung, welche die Zahl der Lösungskandidaten entsprechend zu reduzieren hilft.

Die zweite Gruppe der Linearkombinationen zeichnet sich durch eine zunehmend reduzierte Wellenlänge bei gleichzeitig verringertem Einfluss des Ionosphärenfehlers aus. Sie können als Beobachtungen für die kinematische Positionierung über längere Basislinien bedeutsam werden, da die zu nutzenden (nur eingeschränkt exakten) Ionosphärenmodelle größere Unsicherheiten aufweisen dürfen. Die dritte Gruppe der virtuellen Signale zeichnet sich durch Vertauschung der jeweiligen Kombinationsfaktoren a_1 ; a_2 im Vergleich zur Gruppe 2 aus. Diese Tatsache bewirkt eine deutliche Verstärkung des Ionosphärenfehlers bei entsprechender Vergrößerung der Wellenlänge. Gleichzeitig wird aber der Einfluss der Geometrie reduziert, d.h. diese Signale können Verwendung finden, wenn nur eine approximative Position des Nutzers vorliegt und die Entfernung zur Referenzstation gering ist (der Ionosphärenfehler also in guter Näherung eliminiert wird).

Allgemein sei angemerkt, dass im Rahmen der Festsetzung der Mehrdeutigkeiten im Prinzip nun nur noch jene der Linearkombination fixiert werden müssen, wenn die gewählte Linearkombination zur Koordinierung ausreichend rauscharm ist und somit als »Zielsignal« betrachtet werden kann. Zur kinematischen Positionierung über kurze Basislinien können die ursprünglichen Signale auf L_1 benutzt werden¹², die mit 19 cm Wellenlänge allerdings um den Faktor 4,5 unter jener der *Wide Lane* L_W liegen, letztere weist aber eine mehr als 7fach höhere Standardabweichung auf. In der Praxis kann jedoch eine Lösung auf Basis der L_W -Trägerphasenkombination als erster Schritt zur Mehrdeutigkeitslösung genutzt werden¹³. Bei größeren Entfernungen zu den Basisstationen spielen die Signale $L_{4;3}$, $L_{5;4}$ sowie auch $L_{9;7}$ eine wesentliche Rolle in der hier benutzten Auswertemethode, da sie den ionosphärischen Laufzeitfehler erheblich reduzieren und trotzdem auf Grund ihrer nicht zu kleinen Wellenlängen noch eine realistische Chance zur erfolgreichen Fixierung der Mehrdeutigkeiten bieten, wenn die troposphärische Refraktion hinreichend genau modelliert werden kann. Das Signal $L_{77;60}$ eliminiert den kompletten Ionosphären-Fehler erster Ordnung, kann mit einer Wellenlänge von nur 6 mm jedoch nicht mehr zur Mehrdeutigkeitsfixierung verwendet werden.

2.2 Parameterschätzung

Die Ausgleichung im GAUSS-MARKOV-Modell (»vermittelnde Beobachtungen«) kann als ein klassisches Verfahren der Parameterschätzung bezeichnet werden¹⁴, dem für diese Arbeit eine große Bedeutung zugewiesen werden darf. Sie wird deshalb im Abschnitt 2.2.1 in ihren wesentlichen Details dargestellt. Weiterhin wird als Alternative die sequenzielle Parameterschätzung im KALMAN-Filter vorgestellt, das insbesondere für Echtzeit-Anwendungen häufig angewendet wird. Beide Verfahren werden abschließend in ihren charakteristischen Vor- und Nachteilen kurz gegenübergestellt und bewertet.

2.2.1 GAUSS-MARKOV-Modell

2.2.1.1 Algorithmus

Die Vektor \underline{L} enthält die Beobachtungen. Dabei können unter diesem Begriff tatsächliche »originäre« Messwerte aufgefasst, aber auch abgeleitete Beobachtungen verstanden werden. Im Falle der Verwendung doppelter oder dreifacher Differenzen werden aus Differenzbildungen abgeleitete Messwerte als Beobachtungen verwendet. Weiterhin können auch zuvor geschätzte Parameter im

¹² Vom Rauschniveau her bietet sich auch die *Narrow Lane* L_N an. Diese Linearkombination würde bei gleichen (metrischen) Standardabweichungen auf L_1 und L_2 sogar ein geringeres Rauschen als die originären L_1 Trägerphasen aufweisen. Da jedoch gegenwärtig die Signalverfolgung (engl. *Tracking*) auf L_2 noch auf Grund der Verschlüsselung des P-Kodes und des Fehlens eines anderen Akquisitions-Kodes deutlich schwieriger ist als auf L_1 , wo der C/A-Kode verfügbar ist, ergibt sich ein deutlich höheres Rauschen auf L_2 , was zu einer Degradierung der L_N -Genauigkeit ungefähr auf das Niveau von L_1 führt.

¹³ In Abschnitt 6.2.2.1 wird jedoch auch demonstriert, dass eine direkte Fixierung von L_1 -Signalen bei kurzen Basislinien möglich und der Einsatz von (teuren) Zweifrequenz-Geräten deshalb nicht unbedingt immer notwendig ist.

¹⁴ siehe auch PELZER [1985] und HÖPCKE [1980]

Zuge der Weiterverarbeitung als Beobachtungen in eine Ausgleichung eingeführt werden, beispielsweise zur Bestimmung plattenkinematischer Geschwindigkeiten aus zuvor ermittelten Punktkoordinaten.

Charakteristisch für das Modell der vermittelnden Beobachtungen ist die Tatsache, dass sich die Beobachtungen \underline{L} als Funktion der Unbekannten im Vektor \underline{X} ermitteln lassen. Zunächst sind lediglich genäherte Parameter \underline{X}_o bekannt, aus denen dann die genäherten Beobachtungen

$$\underline{L}_o = \underline{\varphi}(\underline{X}_o) \quad (2.11)$$

hervorgehen. Der Funktionsvektor $\underline{\varphi}$ enthält die bereits im Abschnitt 2.1 diskutierten Beobachtungsgleichungen. In den eigentlichen Ausgleichungsalgorithmus werden dann nur die Differenzen $\Delta \underline{L}$ zwischen den tatsächlichen und den aus Parametern berechneten Beobachtungen

$$\Delta \underline{L} = \underline{L} - \underline{L}_o \quad (2.12)$$

eingeführt (engl. *Pre-Fit Residuals*). Mit Hilfe der Beobachtungsgleichung können weiterhin die zur Aufstellung der Modellmatrix \underline{A} benötigten partiellen Ableitungen berechnet werden¹⁵. Die Differentiation erfolgt zunächst ebenfalls an der Stelle \underline{X}_o :

$$\underline{A} = \left(\frac{\partial \underline{\varphi}(\underline{X})}{\partial \underline{X}} \right)_o \quad (2.13)$$

Grundsätzlich können die partiellen Ableitungen über die Infinitesimalrechnung stets analytisch bestimmt werden. Die Anwendung numerischer Verfahren bietet eine moderne und alternative Berechnungsmöglichkeit¹⁶, weshalb an dieser Stelle nicht mehr auf die analytischen Ausdrücke eingegangen wird.

Auf das stochastische Modell wird im Kapitel 3 ausführlich eingegangen. An dieser Stelle sei allgemein erwähnt, dass die Kofaktormatrix \underline{Q}_{LL} der Beobachtungen aus der Skalarmultiplikation der Kovarianzmatrix $\underline{\Sigma}_{LL}$ mit der reziproken Varianz der Gewichtseinheit σ_o^{-2} (à priori) folgt, wobei σ_o grundsätzlich eine frei wählbare Konstante ist¹⁷. Die Gewichtsmatrix \underline{P} ergibt sich dann aus:

$$\underline{Q}_{LL} = \frac{1}{\sigma_o^2} \cdot \underline{\Sigma}_{LL} \Rightarrow \underline{P} = \underline{Q}_{LL}^{-1} = \sigma_o^2 \cdot \underline{\Sigma}_{LL}^{-1} \quad (2.14)$$

Die Kofaktormatrix der ausgeglichenen Unbekannten berechnet sich zu

$$\underline{Q}_{XX} = (\underline{A}^T \cdot \underline{P} \cdot \underline{A})^{-1} \quad (2.15)$$

¹⁵ Der Ausgleichungsalgorithmus ergibt sich aus einer Taylorentwicklung der Funktionen in Vektor $\underline{\varphi}$, die bereits nach dem ersten Entwicklungsschritt abgebrochen wird, d. h. sämtliche Beobachtungsgleichungen werden linearisiert. Sind die Ableitungen der Beobachtungen nach den Unbekannten unabhängig von den zu bestimmenden Parametern, so handelt es sich à priori bereits um ein lineares Gleichungssystem, und die endgültige Lösung für die ausgeglichenen Unbekannten wird nach einem Durchlauf erhalten. Bei nicht-linearen Beobachtungsgleichungen sind hingegen auf Grund zu ungenauer Näherungswerte häufig mehrere Wiederholungen notwendig. In diesem Fall werden die nach einem Durchlauf erhaltenen ausgeglichenen Unbekannten \underline{X} nachfolgend als neue Näherungsunbekannte \underline{X}_o eingeführt, und die Ausgleichung wird wiederholt. Auf diese Weise werden sich mit jedem Iterationsschritt \underline{X} und \underline{X}_o immer mehr einander angleichen.

¹⁶ siehe bspw. SCHÜLER [2001, Seite 104]

¹⁷ Durch die Wahl $\sigma_o = 1,0$ werden Kofaktor- und Kovarianzmatrix identisch, allerdings bietet sich eine geeignete (und oftmals von 1,0 abweichende) Wahl für σ_o unter dem Gesichtspunkt der numerischen Stabilisierung an. Wird σ_o^{-2} beispielsweise als Mittelwert der Varianzen der einzelnen Beobachtungen gewählt, so nehmen die Diagonalelemente von \underline{Q}_{LL} günstige Werte um 1,0 herum an, wenn geringe Schwankungen in den Standardabweichungen der einzelnen Beobachtungen unterstellt werden können.

und die ausgeglichenen Unbekannten \underline{X} sind

$$\Delta \underline{x} = \underline{Q}_{xx} \cdot (\underline{A}^T \cdot \underline{P} \cdot \Delta \underline{l}) \quad \wedge \quad \underline{X} = \underline{X}_o + \Delta \underline{x} \quad . \quad (2.16)$$

Eine Genauigkeitsschätzung für die Parameter erlaubt die Kovarianzmatrix $\underline{\Sigma}_{xx}$:

$$\underline{\Sigma}_{xx} = \sigma_o^2 \cdot \underline{Q}_{xx} \quad . \quad (2.17)$$

Alternativ kann aus den Verbesserungen

$$\underline{v} = \underline{A} \cdot \Delta \underline{x} - \Delta \underline{l} \quad (2.18)$$

die empirische Varianz der Gewichtseinheit à posteriori

$$s_o^2 = \frac{1}{n-u} \cdot \underline{v}^T \cdot \underline{P} \cdot \underline{v} \quad (2.19)$$

ermittelt werden. Die Anzahl der statistischen Freiheitsgrade ist dabei die Differenz zwischen der Anzahl der Beobachtungen n und der Anzahl der zu schätzenden Parameter u . Zur Unterscheidung wird die *empirische* Kovarianzmatrix der Unbekannten

$$\underline{S}_{xx} = s_o^2 \cdot \underline{Q}_{xx} \quad (2.20)$$

mit lateinischen Buchstaben bezeichnet, während die *theoretische* Kovarianzmatrix mit griechischen Buchstaben notiert wird¹⁸. Bei einer geringen Anzahl von Freiheitsgraden $n-u$ sollte von der Verwendung der empirischen Kovarianzmatrix abgesehen werden, da sie dann häufig zu optimistische Genauigkeitsschätzungen enthält.

2.2.1.2 Partitionierung

Wenn nur ausgewählte Parameter von Interesse sind, der Unbekannten-Vektor also in der Form

$$\underline{X} = [\underline{X}_1 \quad \underline{X}_2]^T \quad \wedge \quad \underline{A} = [\underline{A}_1 \quad \underline{A}_2] \quad (2.21)$$

mit dem gesuchten Vektor \underline{X}_1 gegeben ist, so kann ein partitioniertes Gleichungssystem mit weniger Rechenaufwand gelöst werden. Zur Vereinfachung der Formeln sei noch die Normalgleichungsmatrix

$$\underline{N} = \begin{bmatrix} \underline{N}_{11} & \underline{N}_{12} \\ \underline{N}_{21} & \underline{N}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}_1^T \underline{P} \underline{A}_1 & \underline{A}_1^T \underline{P} \underline{A}_2 \\ \underline{A}_2^T \underline{P} \underline{A}_1 & \underline{A}_2^T \underline{P} \underline{A}_2 \end{bmatrix} \quad \wedge \quad \underline{n} = \begin{bmatrix} \underline{n}_1 \\ \underline{n}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}_1^T \underline{P} \Delta \underline{l} \\ \underline{A}_2^T \underline{P} \Delta \underline{l} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

in die entsprechenden Submatrizen unterteilt. Als Verbesserungsgleichung mit Bezug auf den Zielvektor ergibt sich dann

$$\begin{aligned} \underline{A}_1^* &= \underline{A}_1 - \underline{A}_2 \cdot \underline{N}_{22}^{-1} \cdot \underline{N}_{21} \\ \Delta \underline{l}^* &= \Delta \underline{l} - \underline{A}_2 \cdot \underline{N}_{22}^{-1} \cdot \underline{n}_2 \quad , \\ \underline{v} &= \underline{A}_1^* \cdot \underline{x}_1 - \Delta \underline{l}^* \end{aligned} \quad (2.23)$$

wobei dieses Gleichungssystem nun in gewohnter Weise gelöst werden kann. Diese Partitionierung ist beispielsweise sinnvoll, wenn zunächst nur die unbekannten Mehrdeutigkeiten von Interesse sind oder umgekehrt bei einer nicht-fixierten Positionierung nur der Koordinatenvektor benötigt wird¹⁹.

¹⁸ Mit dem Adjektiv »theoretisch« wird deutlich gemacht, dass die Skalierung der Kofaktormatrix mit der Standardabweichung à priori durchgeführt wird. Die Kovarianzmatrix der Beobachtungen geht im Allgemeinen auf theoretische Annahmen bzgl. der Genauigkeit der Beobachtungen zurück.

¹⁹ Allerdings sind in der Praxis Einschränkungen dieser Methode gegeben, da - wie bereits erwähnt - auf Grund der nicht-linearen Gleichungssysteme mehrfach iteriert werden muss und nur dann eine Verbesserung eintritt,

2.2.1.3 Qualitätskontrolle

Der Konfidenzbereich für die Standardabweichung der Gewichtseinheit

$$P \left\{ \sqrt{s_0^2 \cdot \frac{n-u}{\chi_{n-u, 1-\alpha/2}^2}} \leq \sigma_0 \leq \sqrt{s_0^2 \cdot \frac{n-u}{\chi_{n-u, \alpha/2}^2}} \right\} = 1 - \alpha \quad (2.24)$$

kann als Globaltest des Ausgleichungsmodells aufgefasst werden. Dabei ist χ^2 das entsprechende Quantil der χ^2 -Verteilung und α die Irrtumswahrscheinlichkeit. Liegt der gewählte Wert für σ_0 (à priori) außerhalb dieses Konfidenzintervalls, so kann mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von $1-\alpha$ auf Unstimmigkeiten im stochastischen oder funktionalen Modell geschlossen werden, die zu Diskrepanzen führen und beseitigt werden müssen.

Weiterhin können die einzelnen Beobachtungen einem Ausreißer-Test unterzogen werden. Die Testgröße ergibt sich zu

$$w_i = \frac{|\Delta_i|}{\sigma_{\Delta_i}} \quad \wedge \quad \Delta_i = \frac{-\underline{e}_i^T \cdot \underline{P} \cdot \underline{v}}{\underline{e}_i^T \cdot \underline{P} \cdot \underline{Q}_{VV} \cdot \underline{P} \cdot \underline{e}_i}; \quad \sigma_{\Delta_i} = \sqrt{\frac{\sigma_0^2}{\underline{e}_i^T \cdot \underline{P} \cdot \underline{Q}_{VV} \cdot \underline{P} \cdot \underline{e}_i}} \quad (2.25)$$

wobei an dieser Stelle nur die Methode nach BAARDA²⁰ Erwähnung findet. Dabei bezeichnet Δ_i einen mit Beobachtung i verknüpften Ausreißer, \underline{e}_i ist ein Einheitsvektor mit dem Wert 1,0 an der i -ten Stelle. Die Kofaktormatrix der Verbesserungen \underline{Q}_{VV} ergibt sich aus:

$$\underline{Q}_{VV} = \underline{Q}_{LL} - \underline{A} \cdot \underline{Q}_{XX} \cdot \underline{A}^T \quad (2.26)$$

Wenn der unter n Testgrößen ermittelte Wert einen bestimmten Schwellwert übersteigt - in diesem Fall jenen des Quantils der Normalverteilung mit der gewünschten Sicherheitswahrscheinlichkeit - sollte die entsprechende Beobachtung aus dem Ausgleichungsprozess eliminiert oder durch Vergrößerung der Varianz herabgewichtet werden.

Ob eine Beobachtung als grob fehlerhaft erkannt werden kann, hängt maßgeblich vom »Grad der Kontrolliertheit« ab. Das hier verwendete Zuverlässigkeitsmaß wird auch *Redundanzanteil* genannt. Es handelt sich dabei um die Diagonalelemente der Matrix

$$\underline{R} = (\underline{Q}_{LL} - \underline{A} \cdot \underline{Q}_{XX} \cdot \underline{A}^T) \cdot \underline{P} = \underline{Q}_{VV} \cdot \underline{P} \quad (2.27)$$

deren Werte zwischen 0,0 (nicht kontrolliert) bis 1,0 (sehr stark kontrolliert) variieren können. Im Fall der GPS-Positionierung hängt der Redundanzanteil maßgeblich von der Anzahl der beobachteten Satelliten und der damit zusammenhängenden geometrischen Konstellation ab.

2.2.1.4 Anwendung zur GPS-Positionierung

Das Grobgerüst der dieser Arbeit zu Grunde liegenden Auswertemethodik kann Abbildung 2.1 entnommen werden. In insgesamt 5 Schritten erfolgt die kinematische Positionierung: Begonnen wird mit der **Einzelstationslösung** unter Nutzung nicht-differenzierter Streckenmessungen, gefolgt von der über ein Netzwerk gestützten - und deshalb genaueren - **differentiellen Lösung** mit doppelten Differenzen (ebenfalls Streckenmessungen); während dieses Schrittes erfolgt die Vorverarbeitung sämtlicher Daten, die für nachfolgende Auswerte-Etappen benötigt werden. Die (zeitlich) **relative**

wenn die Modellmatrizen mit den jeweils aktuellen, verbesserten Unbekannten berechnet werden. Diese sind aber wiederum von allen Unbekannten abhängig (\underline{A}_1 und \underline{A}_2 gehen nach wie vor in die Berechnung ein).

²⁰ Siehe BAARDA [1968]; die Testgröße für den Ausreißertest nach POPE [1976] berechnet sich in ähnlicher Weise, nur wird hier eine empirische Standardabweichung s_{Δ_i} unter Verwendung der empirischen Standardabweichung der Gewichtseinheit à posteriori (s_0) ermittelt.

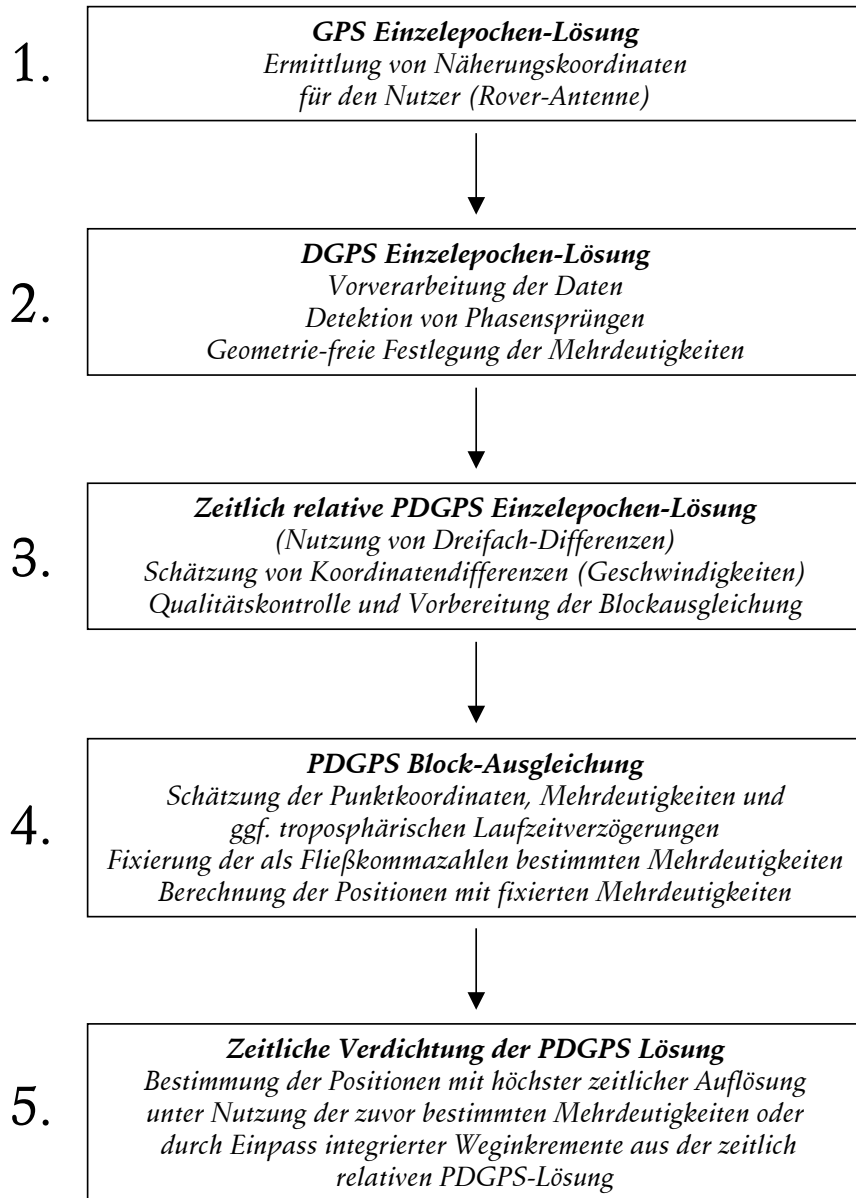


Abbildung 2.1: Verarbeitungsschritte für die kinematische GPS-Positionierung mit der im Rahmen dieser Arbeit zur Anwendung kommenden Auswertemethodik.

Trägerphasenlösung basiert auf dreifachen Differenzen und dient neben der Ableitung der Geschwindigkeiten des sich bewegenden Empfängers auch der unmittelbaren Vorbereitung der **Block-Ausgleichung**, in deren Rahmen die Mehrdeutigkeiten der doppelt-differenzierten Phasenmessungen zusammen mit den Punktkoodinaten und eventuell auch einem troposphärischen Zusatzparameter in einem geschlossenen Block bestimmt werden. Anschließend kann, sofern erforderlich, eine **zeitliche Verdichtung** durch Einzel-Epochenlösungen mit den fixierten Mehrdeutigkeiten oder alternativ durch den Einpass integrierter Wegdifferenzen vorgenommen werden.

2.2.1.4.1 Einzelstationslösung (Schritt 1)

Während der Einzelstationslösung werden originäre Streckenmessungen des GPS-Empfängers als Beobachtungen genutzt:

$$S_{A,Lt,k}^i + v = \left| \underline{X}_k^{i \leftarrow A} - \underline{X}_{A,k} \right| + c \cdot (\delta t_{A,k} - \delta t_k^i) + \delta S_{A,Lt,Ion,k}^i + \delta S_{A,Trop,k}^i \quad (2.28)$$

Der Ionosphärenfehler wird zuvor mit Hilfe der Messungen auf der Zweitfrequenz ermittelt (sofern vorhanden), der Troposphärenfehler mit einem Standardmodell bestimmt. Der Unbekanntenvektor

$$\underline{X} = [x_{A,k} \quad y_{A,k} \quad z_{A,k} \quad \delta t_{A,k}]^T \quad (2.29)$$

enthält die drei kartesischen Koordinatenkomponenten²⁴ x, y, z zur Epoche k im WGS84 bzw. ITRF sowie den Empfängeruhrfehler δt_A . Der Satellitenuhrfehler wird den Ephemeriden-Informationen entnommen. Die Modellmatrix enthält dementsprechend die Elemente

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial S_{A,k}^{Sat1}}{\partial x_{A,k}} & \frac{\partial S_{A,k}^{Sat1}}{\partial y_{A,k}} & \frac{\partial S_{A,k}^{Sat1}}{\partial z_{A,k}} & \frac{\partial S_{A,k}^{Sat1}}{\partial \delta t_{A,k}} \\ \frac{\partial S_{A,k}^{Sat2}}{\partial x_{A,k}} & \frac{\partial S_{A,k}^{Sat2}}{\partial y_{A,k}} & \frac{\partial S_{A,k}^{Sat2}}{\partial z_{A,k}} & \frac{\partial S_{A,k}^{Sat2}}{\partial \delta t_{A,k}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}, \quad (2.30)$$

wobei pro Epoche eine Koordinatenlösung durch Ausgleichung bestimmt wird. Die wesentliche Aufgabe dieses Schrittes besteht lediglich in der Bereitstellung ungefährender Startpositionen für den Rover, um die Anzahl der Iterationsschritte während der nachfolgenden DGPS-Lösung zu minimieren sowie als Hilfe für die Berechnung des Abstrahlzeitpunktes der Signale. Dieser Rechenschritt könnte im Falle ausreichend genauer a priori Positionen - wie sie z. B. bei einer »schnellen statischen« bzw. »halb-kinematischen« Positionierung vorhanden sein könnten - übergangen werden.

2.2.1.4.2 DGPS-Positionslösung (Schritt 2)

Die DGPS-Lösung stellt den eigentlichen ersten Verarbeitungsschritt dar, doch sei erwähnt, dass die Positionslösung auch hier nur als Nebenprodukt betrachtet wird, das zur Konvergenzbeschleunigung bei den nachgeordneten Prozessierungsschritten genutzt wird. Die wesentliche Aufgabe besteht hier in der Vorverarbeitung der Daten, bspw. in der Synchronisation der Messungen²², Quantifizierung der Atmosphärenfehler und der Mehrdeutigkeiten über eine Kombination der Streckenmessungen und Trägerphasen²³. Zur Positionsbestimmung werden in diesem Schritt bereits doppelte Differenzen der Streckenmessungen

$$\begin{aligned} \nabla \Delta S_{AB,LK,k}^{ij} + v &= (S_{B,LK,k}^j - S_{A,LK,k}^j) - (S_{B,LK,k}^i - S_{A,LK,k}^i) + v \\ &= \nabla \Delta \rho_{AB,LK,k}^{ij} + \nabla \Delta \delta S_{AB,LK,k}^{ij}, \end{aligned} \quad (2.31)$$

herangezogen, die in gleicher Weise wie die Trägerphasen linear kombiniert sein können $(LK)^{24}$. Da jene frei von den Uhrfehlern sind, reduziert sich der Parametervektor auf

$$\underline{X} = [x_{A,k} \quad y_{A,k} \quad z_{A,k}]^T \quad (2.32)$$

und die Modellmatrix lautet in Anlehnung zum vorhergehenden Schritt

²⁴ Eine Unterscheidung zwischen den Antennenphasenzentrums-Koordinaten auf L_1 bzw. L_2 ist hier auf Grund der geringen Genauigkeitsforderung nicht notwendig.

²² siehe bspw. SCHÜLER [2001, S. 54 und 81ff]

²³ siehe Abschnitt 2.3.2.1

²⁴ Die Darstellung der Gleichungen für die Streckenmessungen erfolgt trotzdem in metrischen Einheiten und nicht in Zyklen wie bei den Trägerphasen.

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \nabla \Delta S_{AB, LK, k}^{Sat_1, 2}}{\partial x_{A, k}} & \frac{\partial \nabla \Delta S_{AB, LK, k}^{Sat_1, 2}}{\partial y_{A, k}} & \frac{\partial \nabla \Delta S_{AB, LK, k}^{Sat_1, 2}}{\partial z_{A, k}} \\ \frac{\partial \nabla \Delta S_{AB, LK, k}^{Sat_1, 3}}{\partial x_{A, k}} & \frac{\partial \nabla \Delta S_{AB, LK, k}^{Sat_1, 3}}{\partial y_{A, k}} & \frac{\partial \nabla \Delta S_{AB, LK, k}^{Sat_1, 3}}{\partial z_{A, k}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \nabla \Delta S_{AC, LK, k}^{Sat_1, 2}}{\partial x_{A, k}} & \frac{\partial \nabla \Delta S_{AC, LK, k}^{Sat_1, 2}}{\partial y_{A, k}} & \frac{\partial \nabla \Delta S_{AC, LK, k}^{Sat_1, 2}}{\partial z_{A, k}} \\ \frac{\partial \nabla \Delta S_{AC, LK, k}^{Sat_1, 3}}{\partial x_{A, k}} & \frac{\partial \nabla \Delta S_{AC, LK, k}^{Sat_1, 3}}{\partial y_{A, k}} & \frac{\partial \nabla \Delta S_{AC, LK, k}^{Sat_1, 3}}{\partial z_{A, k}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}, \quad (2.33)$$

wobei der Subskript A den sich bewegenden Empfänger bezeichnet (»Rover«) und B , C , usw. die genutzten Referenzstationen bezeichnen sowie Sat_1 den Referenzsatelliten indiziert und Sat_2 , Sat_3 , usw. die sekundären Satelliten, aus denen die doppelten Differenzen hervorgehen.

Werden ungeglättete Streckenmessungen als Beobachtungen genutzt, so kann die Positionsgenauigkeit der DGPS-Lösung für eine einzelne Epoche auf ungefähr 2 bis 6 m abgeschätzt werden, bei Einführung geglätteter Strecken²⁵ verbessert sich die Genauigkeit auf ca. 0,5 bis 3 m.

2.2.1.4.3 Zeitlich relative Trägerphasenlösung (Schritt 3)

Unter der »relativen Trägerphasenlösung« wird in diesem Zusammenhang die Schätzung von Positionsinkrementen bzw. Geschwindigkeiten unter Nutzung dreifacher Differenzen verstanden²⁶, d.h. es erfolgt keine vollwertige Punktbestimmung. Allerdings kann diese Lösung eine Reihe von Anwendungen bedienen, bei denen relative Positionen ausreichend sind, z. B. die Bestimmung kurzzeitiger Meereshöhenvariationen. Die bereits diskutierte Beobachtungsgleichung ist in der Linearkombination (LK) gegeben durch

$$\delta \nabla \Delta \Phi_{AB, LK, k-1, k}^{ij} + v = \lambda^{-1} \cdot (\nabla \Delta \rho_{AB, LK, k}^{ij} - \nabla \Delta \rho_{AB, LK, k-1}^{ij}) + (\nabla \Delta \delta \Phi_{AB, LK, k}^{ij} - \nabla \Delta \delta \Phi_{AB, LK, k-1}^{ij}), \quad (2.34)$$

wobei der Positionsvektor des sich bewegenden GPS-Empfängers zu den Epochen $k-1$ sowie k definiert ist mit

$$\underline{X}_{A, k-1}^* = \underline{X}_{A, k-1} + \delta \underline{X}_{A, k-1} \quad \wedge \quad \underline{X}_{A, k}^* = \underline{X}_{A, k} + \delta \underline{X}_{A, k}, \quad (2.35)$$

und die Positionsdifferenz zwischen beiden Epochen

$$\Delta \underline{X}_{A, k-1, k} = (\underline{X}_{A, k} + \delta \underline{X}_{A, k}) - (\underline{X}_{A, k-1} + \delta \underline{X}_{A, k-1}) \quad (2.36)$$

wird die eigentliche Schätzgröße. Damit lässt sich der Positionsvektor zur Epoche k auch in Abhängigkeit jenes zur zurückliegenden Epoche $k-1$ ausdrücken

$$\underline{X}_{A, k}^* = \underline{X}_{A, k} + \delta \underline{X}_{A, k} = \underline{X}_{A, k-1} + \delta \underline{X}_{A, k-1} + \Delta \underline{X}_{A, k-1, k} \quad (2.37)$$

und die geometrischen Distanzen zwischen Empfänger und Satellit zu den beiden Epochen betragen nun

²⁵ Die Glättung der Strecken ist durch Benutzung der sehr rauscharmen Trägerphasen möglich, weshalb in der Fachliteratur häufig auch von Trägerphasen-Glättung gesprochen wird, siehe bspw. SEEGER [1993].

²⁶ Die Positionierung mit doppelten Differenzen kann als eine *räumlich-relative* Positionierung aufgefasst werden, da die Rover-Koordinaten relativ zur Position der Referenzstation bestimmt werden, während es sich in diesem Fall um eine *zeitlich-relative* (und zusätzlich *räumlich-relative*) Methode handelt, die Positionsdifferenzen relativ zur vorausgegangenen Messepoche liefert.

$$\begin{aligned} \rho_{A,k-t}^i &= \left| (\underline{X}_{k-t}^{i \leftarrow A} + \delta \underline{X}_{k-t}^{i \leftarrow A}) - (\underline{X}_{A,k-t} + \delta \underline{X}_{A,k-t}) \right| \\ \rho_{A,k}^i &= \left| (\underline{X}_k^{i \leftarrow A} + \delta \underline{X}_k^{i \leftarrow A}) - (\underline{X}_{A,k-t} + \Delta \underline{X}_{A,k-t,k} + \delta \underline{X}_{A,k}) \right| \end{aligned} \quad (2.38)$$

Der Vektor der Unbekannten für diesen Schätzprozess

$$\underline{X} = [\Delta x_{A,k-t,k} \quad \Delta y_{A,k-t,k} \quad \Delta z_{A,k-t,k}]^T \quad (2.39)$$

enthält die Koordinaten-Differenzen, während die Koordinaten der Epoche $k-t$ der DGPS-Lösung entstammen und festgehalten werden²⁷. Die Modellmatrix sei schließlich gegeben mit:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial \delta \nabla \Delta \phi_{AB,LK,k-t,k}^{Sat 1,2}}{\partial \Delta x_{A,k-t,k}} & \frac{\partial \delta \nabla \Delta \phi_{AB,LK,k-t,k}^{Sat 1,2}}{\partial \Delta y_{A,k-t,k}} & \frac{\partial \delta \nabla \Delta \phi_{AB,LK,k-t,k}^{Sat 1,2}}{\partial \Delta z_{A,k-t,k}} \\ \frac{\partial \delta \nabla \Delta \phi_{AB,LK,k-t,k}^{Sat 1,3}}{\partial \Delta x_{A,k-t,k}} & \frac{\partial \delta \nabla \Delta \phi_{AB,LK,k-t,k}^{Sat 1,3}}{\partial \Delta y_{A,k-t,k}} & \frac{\partial \delta \nabla \Delta \phi_{AB,LK,k-t,k}^{Sat 1,3}}{\partial \Delta z_{A,k-t,k}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \delta \nabla \Delta \phi_{AC,LK,k-t,k}^{Sat 1,2}}{\partial \Delta x_{A,k-t,k}} & \frac{\partial \delta \nabla \Delta \phi_{AC,LK,k-t,k}^{Sat 1,2}}{\partial \Delta y_{A,k-t,k}} & \frac{\partial \delta \nabla \Delta \phi_{AC,LK,k-t,k}^{Sat 1,2}}{\partial \Delta z_{A,k-t,k}} \\ \frac{\partial \delta \nabla \Delta \phi_{AC,LK,k-t,k}^{Sat 1,3}}{\partial \Delta x_{A,k-t,k}} & \frac{\partial \delta \nabla \Delta \phi_{AC,LK,k-t,k}^{Sat 1,3}}{\partial \Delta y_{A,k-t,k}} & \frac{\partial \delta \nabla \Delta \phi_{AC,LK,k-t,k}^{Sat 1,3}}{\partial \Delta z_{A,k-t,k}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Aus diesen Schätzwerten kann anschließend problemlos auf die mittlere Geschwindigkeit des Empfängers während des Zeitintervalls $\Delta t_{k-t,k} = t_k - t_{k-t}$ geschlossen werden.

2.2.1.4.4 Blockausgleichung der Trägerphasen (Schritt 4)

Die Blockausgleichung der Trägerphasen-Beobachtungen stellt den zentralen Schritt in der Auswertekette dar. Hier werden die Trägerphasen mit einer bestimmten - in der Regel reduzierten - zeitlichen Auflösung zusammen mit weiteren Beobachtungen in einem Block ausgeglichen, um anschließend die zuvor als Fließkommazahlen bestimmten Mehrdeutigkeiten fixieren zu können. Damit die Anzahl der Unbekannten auf ein Minimum reduziert werden kann, wird - wie bei der DGPS-Lösung - auf doppelte Differenzen der Trägerphasen

$$\begin{aligned} \nabla \Delta \phi_{AB,LK,k}^{ij} + v &= (\phi_{B,LK,k}^i - \phi_{A,LK,k}^i) - (\phi_{B,LK,k}^j - \phi_{A,LK,k}^j) + v \\ &= \lambda^{-1} \cdot \nabla \Delta \rho_{AB,LK,k}^{ij} + \nabla \Delta \delta \phi_{AB,LK,k}^{ij} - \nabla \Delta N_{AB,LK}^{ij} \end{aligned} \quad (2.41)$$

in ihrer entsprechenden Linearkombination (LK) zurückgegriffen. Der Beobachtungsvektor darf zusätzlich noch wahlweise Punktkoordinaten, integrierte Geschwindigkeitsmessungen (Positionsdifferenzen) externer Sensoren oder aber Streckenmessungen zwischen Referenzstationen und Rover²⁸ enthalten:

²⁷ Fehler in den Positionen der Epoche $k-t$ wirken sich auf die Koordinatendifferenzen zwischen diesen beiden Epochen auf Grund der vorhandenen starken Korrelation der Fehler nur gering aus, da während der kurzen Zeitspanne die zur Dekorrelation führende Änderung der Satellitengeometrie unwesentlich ist.

²⁸ Die Einführung bekannter Entfernungen zwischen Rover und Basisstation als Beobachtungen beschränkt sich in der Regel auf schnelle statische Messungen, können den Prozess der Lösung von Mehrdeutigkeiten aber deutlich beschleunigen.

$$\underline{L} = \begin{bmatrix} [\nabla\Delta\phi_{AB,LK,k}^{Sat1,2} \quad \nabla\Delta\phi_{AB,LK,k}^{Sat1,3} \quad \dots \quad \nabla\Delta\phi_{AC,LK,k}^{Sat1,2} \quad \nabla\Delta\phi_{AC,LK,k}^{Sat1,3} \quad \dots]^T \\ [\nabla\Delta\phi_{AB,LK,k+1}^{Sat1,2} \quad \nabla\Delta\phi_{AB,LK,k+1}^{Sat1,3} \quad \dots \quad \nabla\Delta\phi_{AC,LK,k+1}^{Sat1,2} \quad \nabla\Delta\phi_{AC,LK,k+1}^{Sat1,3} \quad \dots]^T \\ \vdots \\ [x_k \quad y_k \quad z_k \quad x_{k+1} \quad y_{k+1} \quad z_{k+1} \quad \dots]^T \\ \vee \quad [\Delta x_{k,k+1} \quad \Delta y_{k,k+1} \quad \Delta z_{k,k+1} \quad \Delta x_{k+1,k+2} \quad \Delta y_{k+1,k+2} \quad \Delta z_{k+1,k+2} \quad \dots]^T \\ \vee \quad [|\underline{X}_B - \underline{X}_A| \quad |\underline{X}_C - \underline{X}_A| \quad \dots]^T \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

Da die Ausgleichung »en bloc« erfolgt, enthält der Parametervektor nun die Positionen zu den verschiedenen Zeitpunkten

$$\underline{X} = \begin{bmatrix} [x_{A,k} \quad y_{A,k} \quad z_{A,k}]^T \\ [x_{A,k+1} \quad y_{A,k+1} \quad z_{A,k+1}]^T \\ \vdots \\ [\nabla\Delta N_{AB,LK}^{Sat1,2} \quad \nabla\Delta N_{AB,LK}^{Sat1,3} \quad \dots]^T \\ [\nabla\Delta N_{AC,LK}^{Sat1,2} \quad \nabla\Delta N_{AC,LK}^{Sat1,3} \quad \dots]^T \\ \vdots \\ \delta S_{A,RTrop}^{z=0} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

und weiterhin die einzelnen Mehrdeutigkeiten sowie optional die residuelle troposphärische Laufzeitverzögerung $\delta S_{RTrop}^{z=0}$ in Zenitrichtung ($z=0$), also eine Verbesserung zum Modellwert²⁹. Die Designmatrix \underline{A} kann in insgesamt 6 Submatrizen unterteilt werden

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} \underline{A}_{11} & \underline{A}_{12} & \underline{A}_{13} \\ \underline{A}_{21} & \underline{A}_{22} & \underline{A}_{23} \end{bmatrix}, \quad (2.44)$$

von denen die Submatrix \underline{A}_{11} die partiellen Ableitungen der doppelten Differenzen nach den Koordinaten, \underline{A}_{12} die Ableitungen der Phasenmessungen nach den Mehrdeutigkeiten und \underline{A}_{13} die Ableitungen dieser Beobachtungen nach dem troposphärischen Zusatzparameter enthält. Aus Platzgründen wird hier jeweils nur das erste Element dieser Matrizen formal angegeben.

$$\underline{A}_{11} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \nabla\Delta\phi_{AB,LK,k}^{Sat1,2}}{\partial x_{A,k}} & \dots \\ \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad \underline{A}_{12} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \nabla\Delta\phi_{AB,LK,k}^{Sat1,2}}{\partial \nabla\Delta N_{AB,LK}^{Sat1,2}} & \dots \\ \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad \underline{A}_{13} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \nabla\Delta\phi_{AB,LK,k}^{Sat1,2}}{\delta S_{A,RTrop}^{z=0}} & \dots \\ \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Weiterhin enthalten die Submatrizen \underline{A}_{21} , \underline{A}_{22} und \underline{A}_{23} wahlweise die partiellen Ableitungen der Positionen, Positions διαφοenzen bzw. Strecken nach den Koordinaten, Mehrdeutigkeiten bzw. dem Troposphärenparameter:

$$\underline{A}_{21} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_{A,k}}{\partial x_{A,k}} & \dots \\ \vdots & \ddots \end{bmatrix} = \underline{E} \quad \vee \quad \underline{A}_{21} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta x_{AB,k,k+1}}{\partial x_{A,k}} & \dots \\ \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad \vee \quad \underline{A}_{21} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_{AB}}{\partial x_{A,k}} & \dots \\ \vdots & \ddots \end{bmatrix} \\ \underline{A}_{22} = \underline{O} \\ \underline{A}_{23} = \underline{O} \quad (2.46)$$

Die letzten beiden Submatrizen sind auf Grund nicht vorhandener Abhängigkeiten Nullmatrizen, so dass sich die gesamte Modellmatrix auf

²⁹ Mehr Details über diesen Zusatzparameter werden in Kapitel 4 gegeben. Weiterhin wird im Kapitel 7 gezeigt, dass man die Troposphären-Unbekannte in den Wasserdampfgehalt der Atmosphäre umwandeln kann. Auf diese Weise wird die integrierte Wasserdampfbestimmung auf bewegten Trägern möglich.

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} \underline{A}_{11} & \underline{A}_{12} & \underline{A}_{13} \\ \underline{A}_{21} & \underline{O} & \underline{O} \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

vereinfachen lässt. Nachdem die Fließkommalösung berechnet wurde, erfolgt die Lösung der Mehrdeutigkeiten und anschließend eine Wiederholung der Ausgleichung mit fixierten Mehrdeutigkeiten. In diesem Fall werden dann sämtliche erfolgreich festgesetzten Mehrdeutigkeiten aus dem Parametervektor entfernt, wodurch im Idealfall einer kompletten Fixierung der Mehrdeutigkeiten die Submatrizen \underline{A}_{12} und \underline{A}_{22} aus der Modellmatrix zu streichen wären.

2.2.1.4.5 Zeitliche Verdichtung der PDGPS-Lösung (Schritt 5)

Da die Blockausgleichung häufig mit reduzierter zeitlicher Auflösung der Beobachtungen durchgeführt wird, kommt diesem letzten Verarbeitungsschritt die Aufgabe zu, hochfrequente Positionen zu ermitteln. Dazu bieten sich zwei Methoden an:

Die PDGPS Einzelepochen-Lösung nutzt die zuvor bestimmten Mehrdeutigkeiten, um die Positionierung nunmehr Epoche für Epoche, also mit maximal möglicher zeitlicher Auflösung³⁰, im Gegensatz zur DGPS-Lösung nun jedoch mit Trägerphasen- anstatt mit Streckenmessungen durchzuführen. Die zusätzliche Schätzung der verbleibenden troposphärischen Laufzeitverzögerung ist hier nicht mehr sinnvoll, da diese Größe über längere Zeitintervalle geglättet werden sollte. Der Parametervektor \underline{X} entspricht dem im Abschnitt 2.2.1.3.2 genannten, die Beobachtungsgleichung ist mit jener aus dem vorherigen Abschnitt identisch. Die Modellmatrix entspricht im Prinzip dem Inhalt der Submatrix \underline{A}_{11} , doch reduziert sie sich auf jeweils eine einzige Beobachtungsepoche:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB, LK, k}^{Sat 1, 2}}{\partial x_{A, k}} & \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB, LK, k}^{Sat 1, 2}}{\partial y_{A, k}} & \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB, LK, k}^{Sat 1, 2}}{\partial z_{A, k}} \\ \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB, LK, k}^{Sat 1, 3}}{\partial x_{A, k}} & \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB, LK, k}^{Sat 1, 3}}{\partial y_{A, k}} & \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB, LK, k}^{Sat 1, 3}}{\partial z_{A, k}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AC, LK, k}^{Sat 1, 2}}{\partial x_{A, k}} & \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AC, LK, k}^{Sat 1, 2}}{\partial y_{A, k}} & \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AC, LK, k}^{Sat 1, 2}}{\partial z_{A, k}} \\ \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AC, LK, k}^{Sat 1, 3}}{\partial x_{A, k}} & \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AC, LK, k}^{Sat 1, 3}}{\partial y_{A, k}} & \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AC, LK, k}^{Sat 1, 3}}{\partial z_{A, k}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

Durch die Ausgleichung jeweils einer Epoche kann die Rechengeschwindigkeit erheblich erhöht werden. Die troposphärischen Korrekturen können mit Hilfe des Ergebnisses aus der Blockausgleichung verbessert werden, so dass der Mangel einer nicht mehr vollzogenen Mitschätzung weitgehend neutralisiert wird.

Alternativ wurden gute Erfahrungen mit folgender Methode gesammelt: Die Ergebnisse der relativen PDGPS Lösung (Schritt 3 in Abbildung 2.1) werden innerhalb der zeitlichen Grenzen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Blockausgleichungs-Epochen zu Positionsketten aufintegriert, und der so erhaltene Polygonzug $\underline{x}_0; \underline{x}_1; \dots; \underline{x}_n$ wird in die beiden Randpunkte $\underline{X}_A; \underline{X}_B$ aus vorhergehendem Schritt 4 eingepasst. Bei einer Zeitreihe von Positionen, die durch Integration von Geschwindigkeiten bzw. Inkrementen hervorgeht, kann es zu zufälligen Gängen (engl. »Random Walk«) kommen, die zum Wegdriften der Zeitreihe von der wahren Position führen. Zur Kompensation dieses Effektes eignet sich als Transformationsansatz die Nutzung von drei Translationen und drei individuellen Maßstabsfaktoren³¹ pro Koordinatenrichtung:

³⁰ Bei der Ausgleichung »en bloc« wird die Anzahl der Beobachtungen so reduziert, dass eine Ausgleichung innerhalb einer akzeptablen Zeitspanne möglich ist. Aus diesem Grunde wird die Trajektorie des Rovers bei diesem Auswerteschritt im Allgemeinen nicht mit maximal möglicher zeitlicher Auflösung vorliegen.

³¹ Es werden unterschiedliche Maßstabsfaktoren pro Koordinatenkomponente angesetzt, um den je Achsenrichtung grundsätzlich unterschiedlichen Parametern des zufälligen Ganges Rechnung zu tragen.

$$\underline{X}_i = \begin{pmatrix} \Delta x + q_x \cdot x_i \\ \Delta y + q_y \cdot y_i \\ \Delta z + q_z \cdot z_i \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad \underline{x}_0 = \underline{O} \Rightarrow \Delta \underline{x} \equiv \underline{X}_A \wedge q_x = \frac{X_B - X_A}{x_n}; \text{ usw.} \quad (2.49)$$

Der zufällige Gang tritt allerdings über die kurzen hier vorliegenden Zeitabstände von ca. 5 bis maximal 30 Sekunden nur in seltenen Fällen signifikant in Erscheinung. Deutet der statistische Test für die Maßstabsfaktoren somit nicht auf eine Signifikanz dieser Transformationsparameter hin, so dürfen diese alternativ auf 1,0 gesetzt und statt dessen lediglich der Vektor der mittleren Translationen $\Delta \underline{x}$ verwendet werden:

$$\Delta \underline{x} = \frac{1}{2} \cdot (X_A - x_0 + X_B - x_n) = \frac{1}{2} \cdot (X_A + X_B - x_n) \quad (2.50)$$

Obige Formel gibt die mittlere Translation in x -Richtung an und gilt für den Fall gleichgewichteter Eingangsgrößen.

2.2.2 Sequenzielle Schätzung über das KALMAN-Filter

Die sequenzielle Filterung der unbekannten Parameter ist insbesondere für Echtzeitanwendungen³² eine geeignete Auswertemethode. Auf Grund der großen Bedeutung dieser Schätzmethode wird in diesem Abschnitt für den konkreten Anwendungsfall der kinematischen GPS-Positionierung der Auswertalgorithmus dargestellt. Als Beobachtungen werden dabei Strecken- und Trägerphasenmessungen in Form der doppelten Differenzen verwendet, aus denen die Position, Geschwindigkeit und die Beschleunigung der GPS-Antenne ermittelt werden sollen. Als Bewegungsmodell wird entsprechend eine gleichförmig beschleunigte Bewegung angenommen.

2.2.2.1 Eigenschaften

Nach KLEINSCHMIDT [1989] und KNICKMEYER [1995] handelt es sich beim KALMAN-Filter ebenfalls um einen sog. »optimal-theoretischen« Ansatz. Der Algorithmus arbeitet im statistischen Sinne optimal, d. h. die Zustandsschätzung erfolgt unverzerrt und mit minimaler Varianz. Der Filterprozess läuft in zwei Stufen ab: Zunächst wird der Zustand (bspw. die Koordinaten und Geschwindigkeiten eines Fahrzeugs) fortgeschrieben, anschließend erfolgt die Aufdatierung, welche die eigentliche Filterung darstellt, die in der optimalen Zusammenführung der Beobachtungen und des prädierten Zustandsvektors zur Epoche k besteht. Zur Nullepoche muss der Ausgangszustand bekannt sein, d. h. zur Prädiktion werden Startwerte und die zugehörigen Kovarianzmatrizen benötigt.

Die Grundgleichung des KALMAN-Filters ist eine stochastische Differentialgleichung, was auch voraussetzt, dass der behandelte Prozess stationär und ergodisch ist. Für die Rauschprozesse wird häufig weißes Rauschen angenommen, d. h. zeitlich nachfolgende Werte sind mit vorangehenden nicht korreliert. Die zu filternden Systeme müssen linear und zeitlich veränderlich sein. In der Praxis oft auftretende nichtlineare Zusammenhänge müssen - ebenso wie dies bei den bisher vorgestellten Ausgleichungsmethoden geschieht - zuvor linearisiert werden.

Das Kalman-Filter arbeitet als sequenzielle Schätzmethode rekursiv. Zur Prädiktion werden nur Informationen aus der gegenwärtigen Epoche k und der unmittelbar vorausgehenden Epoche $k-1$ benötigt. Alle weiter zurückliegenden Beobachtungen und Zustände werden nicht benötigt. Die Daten können aus diesem Grunde sequenziell in Echtzeit verarbeitet werden. Neben dem Zustandsvektor wird dabei auch die zugehörige Kovarianzmatrix fortgeschrieben, d. h. der funktionale und stochastische Teil werden in einem einheitlichen Modell behandelt.

³² Auch für Anwendungen, die nicht primär auf Echtzeitbetrieb ausgelegt sind, lässt sich selbstverständlich die KALMAN-Filtertechnik nutzen. Siehe SCHÜLER [2000b] als Beispiel für die KALMAN-Filterung von Troposphärenparametern aus GPS-Beobachtungen von Referenzstationen.

2.2.2.2 Anwendungsfall und Algorithmus

Im konkreten Anwendungsfall soll die GPS-Trajektorie des Rovers gefiltert werden. Neben den geglätteten Positionen sind weiterhin die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen bereitzustellen. Als Beobachtungen fließen zur Epoche k sowohl die doppelten Differenzen der Strecken- als auch der Trägerphasenmessungen

$$\underline{L}_k = \begin{bmatrix} \nabla \Delta S_{AB,LK}^{Sat1,2} \\ \nabla \Delta S_{AB,LK}^{Sat1,3} \\ \vdots \\ \nabla \Delta \phi_{AB,LK}^{Sat1,2} \\ \nabla \Delta \phi_{AB,LK}^{Sat1,3} \\ \vdots \end{bmatrix}_k \quad (2.51)$$

mit der zugehörigen Kovarianzmatrix $\underline{\Sigma}_{LL,k}$ ein. Der Vektor der Unbekannten - in der Kalman-Filterung allgemein als »Zustandsvektor« bezeichnet - lautet in diesem konkreten Fall

$$\underline{X}_k = \begin{bmatrix} [x \ y \ z]^T \\ [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z}]^T \\ [\ddot{x} \ \ddot{y} \ \ddot{z}]^T \\ [\nabla \Delta N_{AB,LK}^{Sat1,2} \ \nabla \Delta N_{AB,LK}^{Sat1,3} \ \dots]^T \end{bmatrix}_k \quad (2.52)$$

mit den geglätteten (»gefilterten«) Koordinaten x, y, z sowie den zugehörigen Geschwindigkeits- und Beschleunigungskomponenten als zeitliche Ableitungen erster und zweiter Ordnung. Zusätzlich müssen die Mehrdeutigkeitsterme als Unbekannte in den Parametervektor aufgenommen werden.

Die Modellmatrix \underline{A} stellt analog zu dem bisher präsentierten Ausgleichungsalgorithmus den Zusammenhang zwischen den Beobachtungen und den Unbekannten (»Zuständen«) her

$$\underline{A}_k = \left(\frac{\partial \phi_k}{\partial \underline{X}_k} \right)_{k-1} . \quad (2.53)$$

In partitionierter Schreibweise mit $\underline{A}_{i1,k}$ (Submatrix der partiellen Ableitungen der Strecken und Trägerphasen nach den Positionen), $\underline{A}_{i2,k}$ (Ableitungen nach den Geschwindigkeiten), $\underline{A}_{i3,k}$ (Ableitungen nach den Beschleunigungen) und $\underline{A}_{i4,k}$ (Ableitungen der Trägerphasen nach den Mehrdeutigkeiten) wird deutlich

$$\underline{A}_k = [\underline{A}_{i1} \ \underline{A}_{i2} \ \underline{A}_{i3} \ \underline{A}_{i4}]_k = [\underline{A}_{i1} \ \underline{O} \ \underline{O} \ \underline{A}_{i4}]_k , \quad (2.54)$$

dass mangels direkter Abhängigkeiten die Submatrizen $\underline{A}_{i2,k}$ und $\underline{A}_{i3,k}$ als Nullmatrizen eingehen und lediglich $\underline{A}_{i1,k}$ und $\underline{A}_{i4,k}$ aufzustellen ist. Erstere Matrix folgt aus

$$\underline{A}_{i1,k} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \nabla \Delta S_{AB,LK}^{Sat1,2}}{\partial x_A} & \frac{\partial \nabla \Delta S_{AB,LK}^{Sat1,2}}{\partial y_A} & \frac{\partial \nabla \Delta S_{AB,LK}^{Sat1,2}}{\partial z_A} \\ \frac{\partial \nabla \Delta S_{AB,LK}^{Sat1,3}}{\partial x_A} & \frac{\partial \nabla \Delta S_{AB,LK}^{Sat1,3}}{\partial y_A} & \frac{\partial \nabla \Delta S_{AB,LK}^{Sat1,3}}{\partial z_A} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB,LK}^{Sat1,2}}{\partial x_A} & \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB,LK}^{Sat1,2}}{\partial y_A} & \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB,LK}^{Sat1,2}}{\partial z_A} \\ \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB,LK}^{Sat1,3}}{\partial x_A} & \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB,LK}^{Sat1,3}}{\partial y_A} & \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB,LK}^{Sat1,3}}{\partial z_A} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}_k \quad (2.55)$$

und $\underline{A}_{t4,k}$ ist in ihrer oberen Hälfte komplett mit Nullen besetzt, da die Streckenmessungen nicht mehrdeutig sind, und anschließend mit

$$\underline{A}_{t4,k} = \begin{bmatrix} \vdots & & \\ \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB,LK}^{Sat 1,2}}{\partial \nabla \Delta N_{AB,LK}^{Sat 1,2}} & \cdots & \\ \vdots & & \ddots \end{bmatrix}_k \quad (2.56)$$

Anhand der Modellmatrix \underline{A}_k wird deutlich: Aus den Beobachtungen zu einer einzigen Epoche lassen sich die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen nicht schätzen. Besondere Bedeutung kommt somit dem Bewegungsmodell zu, das in der sog. *Transitionsmatrix* \underline{T} implementiert wird. Diese Matrix beschreibt die Zeitabhängigkeit der Zustände zu den Epochen k und $k-1$. Für den Allgemeinfall lässt sich nach KNICKMEYER [1995] feststellen, dass eine näherungsweise Berechnung der Transitionsmatrix gemäß der Entwicklung

$$\underline{T}_k \approx \underline{E} + \Delta t \cdot \underline{F}_k + \frac{1}{2} \cdot (\Delta t \cdot \underline{F}_k)^2 + \dots \quad (2.57)$$

unter Ansetzung des Zeitintervalls Δt möglich ist. In diesem Fall handelt es sich um eine *gleichförmig beschleunigte Bewegung*. Die zugrundeliegende Gesetzmäßigkeit lautet

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_k = \int_0^{t_k} \left(\int_0^{t_k} \begin{bmatrix} \ddot{x} & \ddot{y} & \ddot{z} \end{bmatrix}^T \cdot dt \right) \cdot dt = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_o + (t_k - t_o) \cdot \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}_o + \frac{1}{2} \cdot (t_k - t_o)^2 \cdot \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix}_o \quad (2.58)$$

und stellt ein lineares Weg-Zeit-Gesetz dar. Die Transitionsmatrix beschreibt das Weg-Zeit-Gesetz für zwei aufeinander folgende Epochen $\Delta t = t_k - t_{k-1}$ und kann für dieses spezielle Filter nun konstruiert werden. Exemplarisch seien die Zusammenhänge noch einmal anschaulich für die Koordinatenkomponente x und ihre zeitlichen Ableitungen ersten und zweiten Grades angegeben:

$$\begin{aligned} x_k &= x_{k-1} + \dot{x}_{k-1} \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot \ddot{x}_{k-1} \cdot \Delta t^2 \\ \dot{x}_k &= \dot{x}_{k-1} + \ddot{x}_{k-1} \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (2.59)$$

In Matrizenschreibweise erhalten wir unter Berücksichtigung der bereits definierten Struktur des Zustandsvektors \underline{X} entsprechend

$$\underline{T}_k = \begin{bmatrix} \underline{E}_{3,3} & \Delta t \cdot \underline{E}_{3,3} & \frac{1}{2} \cdot \Delta t^2 \cdot \underline{E}_{3,3} & \underline{O} \\ \underline{O} & \underline{E}_{3,3} & \Delta t \cdot \underline{E}_{3,3} & \underline{O} \\ \underline{O} & \underline{O} & \underline{E}_{3,3} & \underline{O} \\ \underline{O} & \underline{O} & \underline{O} & \underline{E}_{n,n} \end{bmatrix}_k \quad (2.60)$$

Dabei werden noch die n Mehrdeutigkeiten berücksichtigt, die als zeitlich invariabel anzusehen sind, solange kein Phasensprung auftritt.

Nun kann der Zustandsvektor zur aktuellen Epoche k aus dem (aufdatierten) Unbekanntenvektor der zurückliegenden Epoche $k-1$ prädiert werden:

$$\underline{X}_k^p = \underline{T} \cdot \underline{X}_{k-1} \quad (2.61)$$

Die zugehörige Kovarianzmatrix wird durch Kovarianzfortpflanzung

$$\underline{\Sigma}_{XX,k}^p = \underline{T}_k \cdot \underline{\Sigma}_{XX,k-1} \cdot \underline{T}_k^T + \underline{\Sigma}_{SS,k} \quad (2.62)$$

mit der Systemrauschmatrix $\underline{\Sigma}_{SS}$ zur aktuellen Epoche berechnet. Diese Rauschmatrix ist von zentraler Bedeutung, da sie die Glättungseigenschaften des Filters bestimmt. In funktionaler Hinsicht wird eine gleichförmig beschleunigte Bewegung unterstellt und die einzelnen Parameter dieser Bewegung werden geschätzt. Es ist nun aber unwahrscheinlich, dass die tatsächliche Bewegung der GPS-Antenne stets exakt diesem deterministischen Modell einer Bewegung auf einer Parabel folgen wird. Abweichungen vom funktionalen Modell können mit Hilfe der Systemrauschmatrix stochastisch modelliert werden. Dazu wird bei jeder Prädiktion die Varianz der einzelnen Zustände in geeigneter Weise erhöht³³. Es wäre möglich, jedem einzelnen Parameter (»Zustand«) ein individuelles Systemrauschen zuzuweisen, allerdings bietet es sich hier in praktischer Hinsicht an, dieses Rauschen auf Basis einer *Störbeschleunigung* zu definieren. Wird weiterhin Isotropie³⁴ unterstellt, so kann die Filterung durch einen einzigen Filterparameter σ_a gesteuert werden. Zusätzlich müssen noch die Mehrdeutigkeiten bedacht werden. Zwar kann in theoretischer Hinsicht unterstellt werden, dass eine stochastische Modellierung als zufälliger Gang hier nicht notwendig ist, sondern die entsprechenden Komponenten der Rauschmatrix durch Nullen zu füllen wären. Diese Ansicht entspricht jedoch nicht den Erfahrungen in der Praxis, da die Mehrdeutigkeitsparameter ebenso wie die Positionen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen von verschiedenen Rauschprozessen beeinflusst werden, bspw. durch Mehrwege-Effekte. Das Prozessrauschen der Mehrdeutigkeiten wird durch den Parameter σ_N charakterisiert³⁵. Die Kovarianzmatrix³⁶ dieser Störbeschleunigungen wird dann

$$\underline{\Sigma}_{aa} = \begin{bmatrix} \sigma_a^2 \cdot \underline{E}_{3,3} & \\ & \sigma_N^2 \cdot \underline{E}_{n,n} \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

und die Umrechnung auf die Varianzen der einzelnen Parameter des Filterprozesses wird über die Systemmatrix

$$\underline{S}_k = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \cdot \Delta t^2 \cdot \underline{E}_{3,3} & \underline{O} \\ \Delta t \cdot \underline{E}_{3,3} & \underline{O} \\ \underline{E}_{3,3} & \underline{O} \\ \underline{O} & \Delta t \cdot \underline{E}_{n,n} \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

vorgenommen. Die ausformulierte Prädiktionsgleichung für die Kovarianzmatrix ergibt sich damit zu

$$\underline{\Sigma}_{XX,k}^p = \underline{T}_k \cdot \underline{\Sigma}_{XX,k-1} \cdot \underline{T}_k^T + \underline{S}_k \cdot \underline{\Sigma}_{aa} \cdot \underline{S}_k^T \quad (2.65)$$

Nunmehr kann der Differenzvektor zwischen tatsächlichen und prädierten Beobachtungen gebildet werden

³³ Wird die Systemrauschmatrix als Nullmatrix angesetzt, so entspräche dies der Annahme, dass die funktionale Beschreibung mit der Realität exakt korrespondiert. Im Sinne der Filtertheorie würde es sich dann um ein starkes Tiefpassfilter handeln. Je höher das Systemrauschen angesetzt wird, desto stärker gehen die Eigenschaften eines Tiefpassfilters verloren. Es sei angemerkt, dass im Rahmen dieser Betrachtung zeitlich nicht-korrelierende stochastische Prozesse unterstellt werden. Ein in der Fachliteratur häufig dargestellter Prozess ist der »zufällige Gang«. Dieser »Random Walk« entstammt einem integrierten Weißen Rauschprozess und wird beispielsweise in der Inertialnavigation zur stochastischen Modellierung von Kreiseldriften benutzt, siehe auch LAWRENCE [1993]. Da er zeitliche Korrelationen aufweist, erfordert dieser Prozess jedoch eine Erweiterung des Zustandvektors (»State Vector Augmentation«), siehe auch BROWN und HWANG [1997, S. 100ff und 225ff].

³⁴ Richtungstunabhängigkeit, d.h. das stochastische Verhalten sei in alle drei Koordinatenrichtungen identisch; Gegenteil: Anisotropie.

³⁵ Einheit: Zyklen pro $\sqrt{\Delta t}$

³⁶ In diesem Anwendungsfall werde die Standardabweichung der Gewichtseinheit mit $\sigma_0 = 1,0$ festgesetzt, so dass Kofaktor- und Kovarianzmatrizen identische Inhalte aufweisen.

$$\underline{\Delta l}_k = \underline{L}_k - \underline{A}_k \cdot \underline{X}_k^P, \quad (2.66)$$

der im Rahmen der Kalman-Filterung auch häufig als »Vektor der Innovationen« bezeichnet wird. Seine Kovarianzmatrix lautet

$$\underline{\Sigma}_{\Delta l,k} = \underline{\Sigma}_{LL} + \underline{A}_k \cdot \underline{\Sigma}_{XX,k}^P \cdot \underline{A}_k^T \quad (2.67)$$

und erlaubt die Berechnung der sog. »Verstärkungsmatrix«

$$\underline{K}_k = \underline{\Sigma}_{XX,k}^P \cdot \underline{A}_k^T \cdot \underline{\Sigma}_{\Delta l,k}^{-1} \quad (2.68)$$

Damit kann nun die Aufdatierung des Zustandsvektors

$$\underline{X}_k = \underline{X}_k^P + \underline{K}_k \cdot \underline{\Delta l}_k \quad (2.69)$$

und der Kovarianzmatrix der Parameter

$$\underline{\Sigma}_{XX,k} = \underline{\Sigma}_{XX,k}^P - \underline{K}_k \cdot \underline{\Sigma}_{\Delta l,k} \cdot \underline{K}_k^T \quad (2.70)$$

erfolgen. Eine Aufdatierung des Zustandsvektors wird nicht vollzogen, wenn keine Beobachtungen vorliegen oder diese fehlerhaft sind. In diesem Fall wird die Verstärkungsmatrix als Nullmatrix angesetzt, woraus folgt, dass der prädierte Zustand mit dem »aufdatierten« identisch ist. Selbiges gilt für die zugehörigen Kovarianzmatrizen.

2.2.2.3 Rückwärtsfilterung

Im Kalman-Filter werden die Zustände Epoche für Epoche sequenziell verbessert. Auf Grund dieser Tatsache können die Zustandsschätzungen in den ersten Epochen (je nach Konvergenzverhalten) noch von ungenügender Genauigkeit sein. Eine Rückwärtsglättung kann hier Abhilfe schaffen. Nach BROWN und HWANG [1997] wird diese Rückwärtsfilterung durch Berechnung der Verstärkungsmatrix

$$\underline{K}_k^{\leftarrow} = \underline{\Sigma}_{XX,k} \cdot \underline{T}_k^T \cdot \left(\underline{\Sigma}_{XX,k+l}^P \right)^{-1} \quad (2.71)$$

durchgeführt. Der geglättete Parametervektor ist dann

$$\underline{X}_k^{\leftarrow} = \underline{X}_k + \underline{K}_k^{\leftarrow} \cdot \left(\underline{X}_{k+l}^{\leftarrow} - \underline{X}_{k+l}^P \right), \quad (2.72)$$

wobei ein Pfeil in Linksrichtung Ergebnisse bezeichnet, die während des rückwärtigen Filterprozesses gewonnen wurden. Die zugehörige Kovarianzmatrix lautet analog

$$\underline{\Sigma}_{XX,k}^{\leftarrow} = \underline{\Sigma}_{XX,k} + \underline{K}_k^{\leftarrow} \cdot \left(\underline{\Sigma}_{XX,k+l}^{\leftarrow} - \underline{\Sigma}_{XX,k+l}^P \right) \cdot \left(\underline{K}_k^{\leftarrow} \right)^T \quad (2.73)$$

Damit wird deutlich: Zur Rückwärtsglättung müssen die prädierten und aufdatierten Zustände sowie deren Kovarianzmatrizen zwischengespeichert werden.

2.2.2.4 Erkennung von Modell- und Beobachtungsfehlern

Ein sogenannter »Globaltest« kann Auskunft geben, ob die vorhergesagten und die tatsächlichen Beobachtungen der aktuellen Messepoche im Einklang stehen. Wenn die Testgröße

$$\underline{\Delta l}_k^T \cdot \underline{\Sigma}_{\Delta l,k} \cdot \underline{\Delta l}_k > \chi_{n,l-\alpha}^2 \quad (2.74)$$

das entsprechende Quantil der χ^2 -Verteilung für n Beobachtungen und die Sicherheitswahrscheinlichkeit $1-\alpha$ überschreitet, deutet dieser Umstand beispielsweise auf grob falsche Beobachtungen, ein unverträgliches Bewegungsmodell, Unzulänglichkeiten im funktionalen Modell oder aber auf unstimulierende stochastische Informationen hin. Analog zum bereits vorgestellten Ausreißertest nach BAARDA [1968] kann nun jedes einzelne Element der Vektors $\underline{\Delta}_i$ getestet werden. Wenn die Testgröße

$$\frac{|\underline{\Delta}_i|}{\sigma_{\Delta_i}} > Y_{1-\alpha/2} \quad (2.75)$$

das Quantil der Normalverteilung für die Irrtumswahrscheinlichkeit α überschreitet, so muss die Nullhypothese (»es liegt kein grober Fehler vor«) verworfen werden. Wird davon ausgegangen, dass die zugehörige Beobachtung der aktuellen Epoche grob fehlerhaft ist, so kann jene entweder eliminiert, oder aber mit einer höheren Standardabweichung belegt werden. Weiterhin kann zum Beispiel der vorläufig aufdatierte Positionsvektor (Teil des Zustandsvektors) untersucht werden. Wenn die Testgröße

$$\underline{X}_k^{*T} \cdot \underline{\Sigma}_{XX,k} \cdot \underline{X}_k^* > \chi_{3,1-\alpha}^2 \quad \wedge \quad \underline{X}_k^* = \underline{K}_k \cdot \underline{\Delta}_k \quad (2.76)$$

das Quantil der χ^2 -Verteilung für die Netzdimension 3 (räumliches Netz) überschreitet, deutet sich an, dass die tatsächliche Bewegung der Antenne nicht mit der prädictierten Trajektorie übereinstimmt. In diesem Fall kann das Systemrauschen erhöht werden und ein neuer Durchlauf des Algorithmus gestartet werden, der dann den aktuellen Beobachtungen höheres Gewicht bei der Positionsschätzung einräumen wird.

2.2.2.5 Vor- und Nachteile für die GPS-Datenanalyse

Die Kalman-Filterung hat inzwischen ihren festen Platz in der Datenanalyse. Ein Vorteil des Einsatzes eines KALMAN-Filters für die GPS-Positionierung liegt beispielsweise in der Tatsache, dass eine Mehrdeutigkeit im Falle des Auftretens eines irreparablen Phasensprungs nicht - wie im Falle der Ausgleichung »en bloc« - anschließend als neue, zusätzliche Unbekannte in den Schätzprozess eingeführt werden muss. Vielmehr kann nach Neu-Initialisierung des Zustandes ohne Änderung der Matrizenstrukturen fortgefahren werden. Ein Nachteil führt jedoch dazu, dass der KALMAN-Filterung in dieser Arbeit nicht der Vorzug gegeben wurde: Ein stimmiges Bewegungsmodell ist von großer Bedeutung und - damit verbunden - eine realistische Abschätzung des Systemrauschens, also die Kenntnis der stochastischen Prozessparameter der Zustandsgrößen, ist von essentieller Wichtigkeit. In der Praxis können diese beiden Forderungen für die kinematische Positionierung grundsätzlich nur schwer erfüllt werden. Unzulänglichkeiten würden unweigerlich zu systematischen Verzerrungen des Zustandsvektors führen. Da nun aber als wesentliches Ziel zunächst die Fixierung der Mehrdeutigkeiten aus einer Fließkommallösung heraus angestrebt werden muss, kommt der Problematik systematischer Fehler eine besonders kritische Bedeutung zu.

Auf Grund der in den letzten Jahren rasant gesteigerten Prozessorleistung und der Vergrößerung des allgemein verfügbaren Arbeitsspeichers können bereits Standard-Personal-Computer die im Abschnitt 2.2.1.3 aufgezeigte Lösungsstrategie über eine Ausgleichung im Modell der vermittelnden Beobachtungen mit voneinander unabhängigen Positionsschätzungen bewältigen. Die reduzierte Rechenzeit, die für den Einsatz eines sequenziellen Filters sprechen würde, kann somit nur noch eingeschränkt als Argument gegen die Ausgleichungsmethode angesehen werden. Echtzeitfähigkeiten sind im Rahmen dieser Arbeit, die sich auf wissenschaftliche Anwendungen konzentriert, von untergeordneter Bedeutung. Als maximale Anforderung kann im ENVISAT-Projekt (Kapitel 6) die »näherungsweise Echtzeit« genannt werden³⁷, in sämtlichen anderen Fällen wurde im Nachprozessierungs-Modus gearbeitet.

³⁷ Verzögerungen von einigen Stunden bis zur Übermittlung des Ergebnisses waren grundsätzlich zulässig.

2.3 Fixierung der Trägerphasen-Mehrdeutigkeiten

Deutlich wurde bereits, dass die Trägerphasen-Messungen der GPS Empfänger eine vergleichsweise hohe Genauigkeit aufweisen. Dieses Genauigkeitspotenzial kann jedoch nur ausgeschöpft werden, wenn es gelingt, den Mehrdeutigkeitsterm zu bestimmen. Im statischen Fall kann die Mitschätzung dieser zusätzlichen Unbekannten als Fließkommazahlen ausreichend sein, wenn über längere Zeiträume beobachtet wird. In der kinematischen Positionierung oder kurzzeitigen statischen Punktbestimmung - auch als »schnelle statische« (*rapid static*) oder »halb-kinematische« (*semi-kinematic*) Positionierung bezeichnet - ist zur Erreichung hoher Präzision die Fixierung der Mehrdeutigkeiten auf ihren ganzzahligen Wert in der Regel notwendig.

Unzählige Methoden wurden inzwischen zur Lösung dieses Problems entwickelt, so dass eine vollständige Darstellung dieses Themas kaum möglich ist, doch können die entwickelten Ansätze auf zwei wesentliche Konzepte zurückgeführt werden, nämlich die geometriefreie sowie die geometriebasierte Mehrdeutigkeitsbestimmung. Die nachfolgenden Abschnitte sollen eine Übersicht geben. Im Rahmen dieser Arbeit wurde insbesondere die LAMBDA-Methode intensiv genutzt, die in Abschnitt 2.3.2.2 als geometriebasiertes Verfahren vorgestellt wird, grundsätzlich aber in gleichem Maße auch für die geometriefreie Mehrdeutigkeitsfindung nutzbar wäre.

2.3.1 Suche im Positionsraum

Die Suche im Positionsraum wird als »Ambiguity-Function-Method« von REMONDI [1984, 1991] und MADER [1992] beschrieben. HASSAN und MEZERA [1997] wenden diese Methode in neuerer Zeit an und suchen nach Optimierungsmöglichkeiten. Auch die Nutzung von Cosinus-Funktionen zur Positionierung von WU und YIU [1997] lehnt sich an dieses Prinzip an:

Um die bekannte Näherungsposition der Antenne herum wird mit Hilfe der vorliegenden Genauigkeitsschätzung ein Gitter von Suchpunkten definiert. Der Abstand der Gitterpunkte wird als Bruchteil der Wellenlänge des Signals festgelegt³⁸. Die Berechnung der *Ambiguity Function*

$$A(x, y, z) = \sum \cos \left[2\pi \cdot (\nabla \Delta \phi_{AB, LK}^{ij} - \nabla \Delta \phi_{AB, LK}^{ij}(x, y, z)) \right] \quad (2.77)$$

erfolgt dann durch Summation der Cosinus-Werte der Differenzen zwischen den beobachteten und jenen über die gegenwärtige Gitterpunkt-Position berechneten Phasenmessungen. Zu jedem Gitterpunkt existiert ein Maß A und derjenige Gitterpunkt, der sich in minimaler Nähe zur realen Antennenposition befindet, sollte den Maximalwert aufweisen, da dann beobachtete und berechnete Trägerphasen ähnlich sind und der Cosinuswert der Differenz nahe bei 1,0 liegen wird.

Vorteil der Methode ist die Insensitivität gegenüber Phasen-Sprüngen³⁹, da der Cosinus eine periodische Funktion ist. Die Ambiguity Function Methode kann im Prinzip auch zur kinematischen Positionierung verwendet werden. Insgesamt weist sie aber Nachteile auf, die in der Mehrheit der kinematischen Anwendungen gegen einen Einsatz im wissenschaftlichen Bereich sprechen. Zunächst kann die Methode trotz vorgenommener Optimierungen als grundsätzlich rechenintensiv bezeichnet werden. Dieser Umstand gewinnt bei ungenaueren Näherungspositionen und damit größeren Suchräumen an Gewicht. Weiterhin kann die Wahl des Gitterabstandes als kritischer Parameter identifiziert werden: Wird er zu klein gewählt, nimmt der Rechenaufwand weiter zu, wird er zu groß gewählt, wird die korrekte Lösung möglicherweise nicht gefunden. Generell muss konstatiert werden, dass die Qualitätsprüfung bei der Ambiguity Function Methode deutlich kritischer einzustufen ist als bei den Suchmethoden im Beobachtungsraum. Insbesondere bei kurzen Beobachtungsdauern entstehen viele Nebenmaxima mit einer Amplitude, die ähnlich derjenigen an demjenigen Gitterpunkt mit der geringsten Entfernung zum wahren Punkt ist (oder sogar größer).

³⁸ Werte zwischen 1 und 6 cm für L_1 werden in der eingangs zitierten Literatur aufgeführt.

³⁹ Sofern der Empfänger nur anfällig gegenüber Phasensprüngen in ganzen Zyklen ist; bestimmte Empfänger können aber auch Phasensprünge in der Größenordnung von halben Zyklen aufweisen, die dann in dieser Form nicht wirksam neutralisiert werden können.

Wie von ZEBHAUSER [1999] demonstriert, eignet sich diese Methode für den Einsatz in der Lehre insofern, als dass sie doch recht einfach nachvollziehbar ist und somit in didaktischer Hinsicht Vorteile aufweist.

2.3.2 Suche im Beobachtungsraum

Die Suche im Beobachtungsraum (den Trägerphasen) hat sich als Verfahren zur Mehrdeutigkeitsbestimmung durchgesetzt. Insbesondere wenn es um die Verarbeitung der Daten in Echtzeit sowie um die Auswertung von kurzen Zeitintervallen geht, kann gegenwärtig den **geometriebasierten** Methoden große Bedeutung beigemessen werden. Die zunächst besprochenen **geometriefreien** Verfahren dürften in Zukunft auf Grund der anstehenden Innovationen in der Satellitennavigation an Bedeutung gewinnen⁴⁰.

2.3.2.1 Geometriefreie Mehrdeutigkeitsbestimmung

Ein denkbar einfacher Weg zur Bestimmung der Mehrdeutigkeiten besteht in der Kombination von Streckenmessungen, die keinen Mehrdeutigkeitsterm aufweisen, und Trägerphasen. Diese Methode wird auch als »geometriefreier« Ansatz bezeichnet, da sie keine à priori Informationen über die Position der Antenne verwendet und wird auch nicht durch die geometrische Satelliten-Konstellation beeinflusst. Das vergleichsweise hohe Rauschniveau der GPS-Strecken erlaubt häufig jedoch keine zuverlässige Fixierung des Ganzzahlwertes. Eine Ausnahme bildet die *Wide Lane* Linearkombination (L_W) auf Grund ihrer großen Wellenlänge. Unabhängig von der Möglichkeit oder Unmöglichkeit der Mehrdeutigkeits-Fixierung bietet die Kombination von Kode- und Trägerphasen jedoch grundsätzlich eine effiziente Möglichkeit, Näherungswerte für die Mehrdeutigkeiten zu bestimmen.

2.3.2.1.1 Grundprinzip

Das Grundprinzip sei zunächst an Einzelfrequenz-Messungen auf L_1 veranschaulicht: Werden die Gleichungen zur Beschreibung der Strecken-Messungen

$$S_{A,L1,k}^i = \rho_{A,k}^i + c \cdot (\delta t_{A,k} - \delta t_k^i) + \delta S_{A,L1,Ion,k}^i + \delta S_{A,Trop,k}^i + \epsilon_S \quad (2.78)$$

und der Trägerphasen

$$\phi_{A,L1,k}^i \cdot \lambda_{L1} = \rho_{A,k}^i + c \cdot (\delta t_{A,k} - \delta t_k^i) - \delta S_{A,L1,Ion,k}^i + \delta S_{A,Trop,k}^i - \lambda_{L1} \cdot N_{A,L1}^i \quad (2.79)$$

voneinander subtrahiert

$$S_{A,L1,k}^i - \phi_{A,L1,k}^i \cdot \lambda_{L1} = 2 \cdot \delta S_{A,L1,Ion,k}^i + \lambda_{L1} \cdot N_{A,L1}^i, \quad (2.80)$$

so verbleibt neben dem Mehrdeutigkeitsterm nur die ionosphärische Laufzeitverzögerung in der resultierenden Gleichung⁴¹. Nach den Mehrdeutigkeiten aufgelöst folgt somit

$$N_{A,L1}^i = \frac{(S_{A,L1,k}^i - \phi_{A,L1,k}^i \cdot \lambda_{L1}) - 2 \cdot \delta S_{A,L1,Ion,k}^i}{\lambda_{L1}} \quad (2.81)$$

bzw. im Modell der doppelten Differenzen

$$\nabla \Delta N_{A,L1}^{ij} = \frac{(\nabla \Delta S_{A,L1,k}^{ij} - \nabla \Delta \phi_{A,L1,k}^{ij} \cdot \lambda_{L1}) - 2 \cdot \nabla \Delta \delta S_{A,L1,Ion,k}^{ij}}{\lambda_{L1}}. \quad (2.82)$$

⁴⁰ siehe dazu auch Kapitel 8

⁴¹ allerdings in zweifach verstärkter Größe

Auf Grund der für eine unmittelbare Fixierung unzureichenden Genauigkeit der Strecken-Messungen, die häufig nicht auf Grund des Empfängerrauschens, sondern insbesondere durch vorhandene Mehrwege-Effekte herabgesetzt wird, muss ein Mittelwert über eine ausreichend große Zeitspanne gewonnen werden. Problematischen Einfluss übt bei Einfrequenz-Daten der Ionosphären-Fehler aus, der mit doppelter Amplitude in die Gleichung eingeht. Auf Grund der Restunsicherheiten in den ionosphärischen Korrekturen wäre diese Methode somit nur für kurze Basislinien geeignet, bei denen der doppelt differenzierte Ionosphärenfehler vernachlässigbar gering bleibt. Über lange Basislinien kann diese Methode jedoch ebenfalls Anwendung finden, doch werden hier Zweifrequenz-Daten benötigt.

Werden geometrische Distanz und troposphärische Laufzeitverzögerung zusammengefasst

$$\nabla \Delta \rho_{A,k}^{ij*} = \nabla \Delta \rho_{A,k}^{ij} + \nabla \Delta \delta S_{A,Trop,k}^{ij}, \quad (2.83)$$

die Gleichungen bzgl. der Strecken auf L_1 und L_2

$$\begin{aligned} \nabla \Delta S_{A,L1,k}^{ij} &= \nabla \Delta \rho_{A,k}^{ij*} + \nabla \Delta \delta S_{A,L1,Ion,k}^{ij} \\ \nabla \Delta S_{A,L2,k}^{ij} &= \nabla \Delta \rho_{A,k}^{ij*} + \nabla \Delta \delta S_{A,L2,Ion,k}^{ij} = \nabla \Delta \rho_{A,k}^{ij*} + \left(\frac{f_{L1}}{f_{L2}} \right)^2 \cdot \nabla \Delta \delta S_{A,L1,Ion,k}^{ij} \end{aligned} \quad (2.84)$$

mit f_{L1} bzw. f_{L2} als Frequenzen der Trägerwellen L_1 und L_2 genutzt und weiterhin die Trägerphasen-Gleichung für eine prinzipiell beliebige Linearkombination

$$\nabla \Delta \Phi_{AB,LK,k}^{ij} = \lambda_{LK}^{-1} \cdot (\nabla \Delta \rho_{AB,LK,k}^{ij*} - \nabla \Delta \delta \Phi_{A,LK,Ion,k}^{ij}) - \nabla \Delta N_{A,LK}^{ij} \quad (2.85)$$

aufgestellt, so erhalten wir 3 Gleichungen, mit denen die drei Unbekannten

$$\nabla \Delta \rho_{A,k}^{ij*} \quad \nabla \Delta \delta S_{A,L1,Ion,k}^{ij} \quad \nabla \Delta N_{A,LK}^{ij} \quad (2.86)$$

bestimmt werden können. Dies sind die (a) Distanz (mit dem Troposphärenfehler vermischt), die (b) ionosphärische Laufzeitverzögerung (auf der primären Trägerwelle⁴²) und die (c) Mehrdeutigkeit der linear kombinierten Trägerphase (nun frei vom Ionosphärenfehler, im Vergleich zur vorhergehend präsentierten Lösung aber wegen Fehlerfortpflanzung auf einem höheren Rauschniveau).

2.3.2.1.2 Glättung

Der Glättungsprozess über n Epochen führt zur Verbesserung der Genauigkeit der Mehrdeutigkeit und ergibt sich im einfachsten Fall aus der Berechnung des arithmetischen Mittelwertes

$$\nabla \Delta N_{AB,LK}^{ij} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=t}^n \nabla \Delta N_{AB,LK,k}^{ij} \quad (2.87)$$

oder aber durch eine Mittelwertbildung, die zur reziproken Varianz gewichtet wird

$$\nabla \Delta N_{AB,LK}^{ij} = \frac{\sum_{k=t}^n \sigma_{\nabla \Delta N_k}^{-2} \cdot \nabla \Delta N_{AB,LK,k}^{ij}}{\sum_{k=t}^n \sigma_{\nabla \Delta N_k}^{-2}}, \quad (2.88)$$

was insofern sinnvoll sein kann, als die Unsicherheit der bestimmten Mehrdeutigkeit bei niedrigen Elevationen auf Grund des schlechteren Signal-Rausch-Verhältnisses im Allgemeinen schlechter sein wird und die Einführung von Gewichten somit zu einer weniger verzerrten Schätzung führen dürfte.

⁴² Der Ionosphärenfehler auf L_1 kann problemlos in den auf L_2 gültigen Wert umgerechnet werden; siehe auch Abschnitt 3.4.9.1.

2.3.2.1.3 Genauigkeitsabschätzung

Die empirische Standardabweichung der mittleren Mehrdeutigkeit kann aus den Verbesserungen v in bekannter Weise ermittelt werden⁴³

$$s_{\nabla\Delta N} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n v_k^2}{n \cdot (n-1)}} \quad , \quad (2.89)$$

führt aber in den meisten Fällen zu erheblich zu optimistischen Schätzungen, da obige Formel von stochastisch unabhängigen Größen ausgeht. Diese Annahme ist bei der Nutzung kombinierter GPS-Strecken- und Trägerphasenmessungen häufig nicht gegeben. Beispielsweise werden die Streckenmessungen häufig geglättet (Trägerphasen-Glättung), was zu Auto-Korrelationen führt, ebenso wie die Auswirkungen von Mehrwegefehlern. Weiterhin kommt es auf Grund der Methoden zur Akquisition der L_2 -Trägerphasen ebenfalls zur Auto-Korrelation - zumindest bezüglich der L_2 -Messungen⁴⁴.

In Anlehnung an TAUBENHEIM⁴⁵ [1969] kann eine Zeitreihe von Werten, in unserem Fall also doppelt differenzierten und linear kombinierten Mehrdeutigkeiten, zu den Zeitpunkten $t_{1,2,\dots,n}$

$$\nabla\Delta N(t_1), \nabla\Delta N(t_2), \nabla\Delta N(t_3), \dots, \nabla\Delta N(t_n) \quad (2.90)$$

mit dem wahren Wert μ bzw. dem Erwartungswert E

$$\mu(t) = E\{\nabla\Delta N(t)\} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \nabla\Delta N(t_i) \right) \quad (2.91)$$

und der Varianz

$$\sigma^2(t) = E\{(\nabla\Delta N(t) - \mu(t))^2\} = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n [\nabla\Delta N(t_i) - \mu(t_i)]^2 \right) \quad (2.92)$$

durch die zugeordnete Auto-Kovarianzfunktion

$$C(t, \tau) = E\{[\nabla\Delta N(t) - \mu(t)] \cdot [\nabla\Delta N(t + \tau) - \mu(t + \tau)]\} \quad \wedge \quad C(t, 0) = \sigma^2(t) \quad (2.93)$$

mit τ als Zeitinkrement charakterisiert werden. Die empirische Funktion ergibt sich zu

$$C(k) = \frac{1}{n-k-1} \cdot \sum_{i=1}^{n-k} [(\nabla\Delta N_{t_i} - \nabla\Delta N_{t_0}) \cdot (\nabla\Delta N_{t_{i+k}} - \nabla\Delta N_{t_0})] \quad \wedge \quad \tau = k \cdot \Delta t \quad (2.94)$$

mit n als Stichproben-Anzahl, m als Anzahl der Werte der Auto-Kovarianzfunktion⁴⁶ und $k = 0, 1, 2, \dots, m$ als Index. Der Mittelwert $\nabla\Delta N_0$ wird in diesem Zusammenhang als Erwartungswert bzw. wahrer Wert betrachtet. Die Auto-Korrelationsfunktion folgt mit

$$R(k) = \frac{C(k)}{C(0)} \quad (2.95)$$

⁴³ hier nur für die ungewichtete Mittelwertbildung dargestellt

⁴⁴ siehe auch BONA [2000]

⁴⁵ TAUBENHEIM [1969] wendet die dargestellten statistischen Verfahren auf Zeitreihen aus Geophysik und Meteorologie an, doch kann wegen ihres Grundlagen-Charakters ohne Einschränkungen auch eine Adaption für die hier vorliegenden Probleme erfolgen.

⁴⁶ Im Allgemeinen wird auf Grund von Genauigkeitsbetrachtungen die Wahl $m = n/10$ empfohlen.

AFx 0010002629	4426	58	29391,000	0,001	51747	53959	37
AFx-0010002610	132	7	-3684881,916	0,271	51747	51812	1
AFx 0010002618	4426	86	-2407259,798	0,174	51747	53959	37
AFx 0010002628	4426	97	539751,175	0,151	51747	53959	37
AFx 0010002631	4426	62	-1313194,000	0,001	51747	53959	37
AFx 0010002607	4426	82	-2026798,000	0,001	51747	53959	37

Tabelle 2.3: Protokoll-Auszug über die geometriefreie Bestimmung der Mehrdeutigkeiten (in diesem Fall der Wide Lane) mit Hilfe der Kombination von Strecken- und Trägerphasenmessungen. (2. Spalte: ID der Kombination; 3. Spalte: Anzahl der originären Bestimmungen; 4. Spalte: Anzahl der stochastisch unabhängigen Werte; 5. Spalte: ermittelte Mehrdeutigkeit; 6. Spalte: zugehörige Standardabweichung; 7. Spalte: Beginn des Beobachtungsfensters in GPS-Tagessekunden; 8. Spalte: Ende des Beobachtungsfensters; 9. Spalte: Beobachtungsdauer in Minuten; AFx-: Mehrdeutigkeit nicht lange genug beobachtet, wird ausgeschlossen)

und weist einen Wertebereich von -1,0 (maximale negative Korrelation) bis +1,0 (maximale positive Korrelation) auf.

Mit Hilfe der Auto-Korrelationsfunktion kann nun die Anzahl der tatsächlich voneinander stochastisch unabhängigen Werte, auch *effektive Messwertanzahl* genannt, nach der Formel

$$n_{\text{EFF}} = \frac{n}{1 + 2 \cdot \sum_{k=1}^m \frac{n-k}{n} \cdot R(k)} \quad (2.96)$$

abgeschätzt werden und die Standardabweichung des Mittelwertes kann entsprechend angepasst werden:

$$s_{\text{VAN}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n v_k^2}{n_{\text{EFF}} \cdot (n-1)}} \quad (2.97)$$

Nur für den Fall nicht vorhandener Korrelationen zwischen den einzelnen Messgrößen folgt

$$R(k) = 0 \quad \forall \quad k > 0 \quad \Rightarrow \quad n_{\text{EFF}} = n \quad , \quad (2.98)$$

während in der Praxis grundsätzlich davon auszugehen ist, dass $n_{\text{EFF}} < n$ ist und die nicht korrekte Verwendung von n zu einer zu optimistischen Abschätzung der Standardabweichung des Mittelwertes führt. Tabelle 2.3 zeigt einen Protokollauszug, wie er bei der Auswertung von GPS-Messungen erhalten wurde⁴⁷. Bis auf eine Mehrdeutigkeitskombination wurden alle 5 weiteren über einen Zeitraum von 37 Minuten kontinuierlich mit einer Taktrate von 2 Hz beobachtet. Trotz der originären Anzahl von 4426 Werten sind jedoch nur 58 bis 97 der bestimmten Mehrdeutigkeiten stochastisch voneinander unabhängig. Bei Ansetzung der originären Messwertanzahl zur Berechnung der empirischen Standardabweichung würde eine Abschätzung der Präzision erfolgen, die um den Faktor 6,8 bis 8,7 zu optimistisch wäre! Bei Ansetzung der höheren Standardabweichungen, die unter Nutzung der effektiven Messwertzahlen mit Hilfe der empirischen Auto-Korrelationsfunktionen ermittelt wurden, wird nur in 3 der 5 Fälle eine Fixierung der Mehrdeutigkeiten durchgeführt⁴⁸, während in den anderen beiden Fällen die gewählten (recht strengen) Schwellwerte eine Festsetzung nicht erlaubten.

Abschließend sei angemerkt, dass die Berechnung der effektiven Messwertanzahl nur bei ausreichend großer Stichprobenbreite mit einer entsprechenden Genauigkeit erfolgt. Im Falle kinematischer GPS-Anwendungen mit hohen Taktraten ist diese Voraussetzung im Allgemeinen gegeben, wenn kein Zwang zur Fixierung in möglichst kurzer Zeit besteht.

⁴⁷ siehe Abschnitt 5.3.1 für weitere zu diesem Datensatz gehörige Ergebnisse

⁴⁸ ersichtlich durch die Herabsetzung der Standardabweichung auf 0,001 Zyklen nach erfolgter Fixierung

2.3.2.1.4 Prüfung

Sollen die Mehrdeutigkeiten über eine Rundung zur nächsten Ganzzahl fixiert werden⁴⁹, also auf eine Suche verzichtet werden, so kann die Prüfung in zwei Schritten erfolgen: Zunächst wird getestet, ob die Standardabweichung des Fließkommawertes der Mehrdeutigkeit im Vergleich zur Wellenlänge des Signals überhaupt eine Festlegung des Ganzzahlwertes zulässt oder aber das Rauschniveau zu hoch ist. Um eine zuverlässige Fixierung zu ermöglichen, muss sichergestellt sein, dass der Fehler der Fließkommazahl unterhalb eines halben Zyklus liegt, da andernfalls die Gefahr einer falschen Rundung besteht. **Überschreitet** also die Testgröße

$$t_f = \frac{1}{2 \cdot s_{\nabla N}} \quad (2.99)$$

den Wert des Quantils der t-Verteilung für $f = n-1$ Freiheitsgrade und die Irrtumswahrscheinlichkeit α , so kann von einer ausreichend hohen Genauigkeit ausgegangen werden.

In einem zweiten Schritt wird überprüft, ob die Differenz zwischen der fixierten (also zur nächsten Ganzzahl gerundeten) Mehrdeutigkeit und dem Fließkommawert mit der zugehörigen Standardabweichung verträglich ist. Wenn also die Testgröße

$$t_f = \frac{|\nabla \Delta N_{\text{FIXIERT}} - \nabla \Delta N|}{s_{\nabla N}} \quad (2.100)$$

den Wert des Quantils der t-Verteilung für f Freiheitsgrade und die gewählte Sicherheitswahrscheinlichkeit **unterschreitet**, kann von einer insignifikanten Abweichung zwischen Ganzzahl und Fließkommazahl ausgegangen und die Fixierung vorgenommen werden. Andernfalls deutet sich an, dass die empirische Standardabweichung s zu optimistisch abgeschätzt wurde und in diesem Zusammenhang keine verlässliche Lösung möglich ist.

2.3.2.1.5 Ausnutzung von Nebenbedingungen

Werden bestimmte Linearkombinationen zusammenhängend bearbeitet, können sich Nebenbedingungen ergeben, die eine Fixierung auf den korrekten Ganzzahlwert vereinfachen. Wurde z. B. die Mehrdeutigkeit der *Wide Lane* (L_W) erfolgreich ermittelt, so kann für die zugehörige Mehrdeutigkeit der *Narrow Lane* (L_N) festgestellt werden, dass sie in gleicher Weise wie die *Wide Lane* entweder einen geraden oder einen ungeraden Wert aufweisen muss (»Gerade-Ungerade-Bedingung«). Auf diese Weise können bestimmte Lösungen ausgeschlossen werden⁵⁰.

2.3.2.2 Geometriebasierte Verfahren

In Abschnitt 2.2 wurde das funktionale Modell zur Ausgleichung der Trägerphasen gegeben. Als Ergebnis liegt dann - wenn der zusätzliche Troposphären-Parameter für den Moment vernachlässigt wird - ein Ergebnisvektor vor, der in zwei Sub-Vektoren aufgeteilt werden kann, ebenso wie die zugehörige Kovarianzmatrix. Die Mehrdeutigkeiten seien dabei - wegen ihrer zentralen Bedeutung in diesen Kapitel - an führender Stelle aufgeführt:

$$\underline{X} = \begin{bmatrix} \underline{X}_{\nabla N} \\ \underline{X}_{XYZ} \end{bmatrix} \quad \wedge \quad \underline{\Sigma}_{XX} = \begin{bmatrix} \underline{\Sigma}_{\nabla N} & \underline{\Sigma}_{XYZ, \nabla N} \\ \underline{\Sigma}_{XYZ, \nabla N} & \underline{\Sigma}_{XYZ} \end{bmatrix} \quad (2.101)$$

⁴⁹ Wird das hier beschriebene geometriefreie Verfahren nicht in Form einzelner Zeitreihen-Analysen unabhängig voneinander analysiert, sondern bspw. ein Filter konstruiert, in dem sämtliche Mehrdeutigkeiten geschätzt werden, so können in der zugehörigen Kovarianzmatrix auch Korrelationen zwischen den einzelnen Schätzgrößen auftreten. In diesem Fall wäre die Rundung nur noch ein sub-optimaler Ganzzahl-Schätzer. Es können aber die im nachfolgenden Abschnitt »geometriebasierte Verfahren« beschriebenen Suchverfahren zur Anwendung kommen.

⁵⁰ siehe bspw. SEEGER [1989, 1993]

Die als Fließkommazahlen bestimmten Mehrdeutigkeiten werden nun in einem nachfolgend noch genauer beschriebenen Prozess in ihre wahrscheinlichsten Ganzzahlwerte überführt. Als Ergebnis liegt dann der Vektor der fixierten Mehrdeutigkeiten $\underline{X}_{\nabla\Delta N}^{FIX}$ vor. Die Koordinatenlösung unter Ausnutzung der ganzzahligen Mehrdeutigen kann nun auf einfache Weise durch erneute Ausgleichung ermittelt werden, indem diese Werte nun nicht länger als Parameter mitgeschätzt werden, sondern als Konstanten in den Beobachtungsgleichungen verbleiben. Alternativ folgt die Koordinatenlösung gemäß TEUNISSEN [2003a] auch mit

$$\underline{X}_{XYZ}^{FIX} = \underline{X}_{XYZ} - \underline{\Sigma}_{XYZ,\nabla\Delta N} \cdot \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N}^{-1} \cdot (\underline{X}_{\nabla\Delta N} - \underline{X}_{\nabla\Delta N}^{FIX}) \quad (2.102)$$

mit der Kovarianzmatrix

$$\underline{\Sigma}_{XYZ}^{FIX} = \underline{\Sigma}_{XYZ} - \underline{\Sigma}_{XYZ,\nabla\Delta N} \cdot \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N}^{-1} \cdot \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N,XYZ} + \underline{\Sigma}_{XYZ,\nabla\Delta N} \cdot \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N}^{-1} \cdot \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N}^{FIX} \cdot \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N}^{-1} \cdot \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N,XYZ} \quad (2.103)$$

In der Praxis reduziert sich diese Formel bei Unterstellung einer korrekten Fixierung, also

$$\underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N}^{FIX} = \underline{O} \quad , \quad (2.104)$$

auf

$$\underline{\Sigma}_{XYZ}^{FIX} = \underline{\Sigma}_{XYZ} - \underline{\Sigma}_{XYZ,\nabla\Delta N} \cdot \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N}^{-1} \cdot \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N,XYZ} \quad (2.105)$$

2.3.2.2.1 Fixierung der Mehrdeutigkeiten

Grundsätzlich besteht das Ziel im Sinne der Methode der kleinsten Quadratsumme in der Minimierung des Ausdrucks⁵⁴

$$\chi^2 = (\underline{X}_{\nabla\Delta N} - \underline{X}_{\nabla\Delta N}^*)^T \cdot \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N}^{-1} \cdot (\underline{X}_{\nabla\Delta N} - \underline{X}_{\nabla\Delta N}^*) \longrightarrow \min \quad , \quad (2.106)$$

der nach WERNER [1999] ein n -dimensionales Hyper-Ellipsoid beschreibt. Wegen der Ganzzahl-Natur dieses Problems kann eine Lösung nicht mit Standard-Methoden erfolgen. Unter der Vielzahl der entwickelten Verfahren, die ganzzahligen Mehrdeutigkeiten zu bestimmen, werden repräsentativ 4 Verfahren beschrieben, wobei die Rundung und das »Bootstrapping« im eigentlichen Sinne keine Suchverfahren sind, sehr wohl aber gemäß TEUNISSEN [2002b, 2003a] in die Gruppe der *zulässigen* Ganzzahl-Schätzer fallen und aus didaktischen Gründen hier einbezogen werden sollen.

Rundung

Die denkbar einfachste und in Abschnitt 2.3.2.1 bereits angewendete Methode besteht in der Rundung der ausgeglichenen Fließkomma-Mehrdeutigkeiten zur nächstgelegenen Ganzzahl

$$\underline{X}_{\nabla\Delta N}^{FIX} = \text{nint}(\underline{X}_{\nabla\Delta N}) \quad , \quad (2.107)$$

wobei *nint* den Rundungsoperator zur nächsten Ganzzahl symbolisiert. Es wird deutlich, dass dieser Ganzzahl-Schätzer keine der in der Kovarianzmatrix der Mehrdeutigkeiten enthaltenen Informationen verarbeitet. In theoretischer Hinsicht ist diese Lösung somit noch unbefriedigend, weil die eingangs formulierte Minimierungs-Bedingung nicht erfüllt werden kann, solange zwischen den einzelnen Mehrdeutigkeiten signifikante Korrelationen bestehen. Dies ist insbesondere bei Kurzzeit-Beobachtungen noch stark der Fall. Erfolgt die Mehrdeutigkeitsbestimmung hingegen über einen längeren Zeitraum, so ergibt sich auf Grund sich ändernder Satelliten-Geometrie eine stärkere Dekorrelation der Mehrdeutigkeiten und die Ganzzahl-Rundung kann dann eher eingesetzt werden.

⁵⁴ Die ganzzahlige Mehrdeutigkeit wird in diesem Zusammenhang mit einem Sternchen gekennzeichnet.

rischen Standardabweichungen) entspricht. Für sämtliche Kombinationen wird nun die Quadratsumme χ^2 ermittelt, und der zum gefundenen Minimum gehörige Vektor der ganzzahligen Mehrdeutigkeiten wird übernommen.

»Least-Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment« - LAMBDA

Trotz der offensichtlichen Reduktion der Rechenzeit bleibt das zuvor beschriebene Verfahren immer noch rechenintensiv. Die »Integer Least-Squares« Suche nach TEUNISSEN [1995] ist ein effizientes Verfahren, das sich in der Praxis inzwischen sehr weit verbreitet hat und von DE JONGE und TIBERIUS [1996] ausführlich dokumentiert wurde.

Grundsätzlich wird ähnlich vorgegangen wie bereits erläutert. Der wesentliche Gedanke fußt aber auf der Erkenntnis, dass starke Korrelationen zwischen den Mehrdeutigkeiten zu einer Längung des Hyper-Ellipsoids führen. Daher wird eine geeignete Dekorrelation durchgeführt. Diese transformierten und dekorrelierten Mehrdeutigkeiten ergeben sich aus

$$\underline{X}_{\nabla\Delta N}^{DK} = \underline{Z}^T \cdot \underline{X}_{\nabla\Delta N} \quad . \quad (2.114)$$

Die Transformationsmatrix \underline{Z} hat dabei ganzzahlige Einträge und ergibt sich nach WERNER [1999] aus einer Aneinanderkettung von Gauß-Transformationen. Die transformierte Kovarianzmatrix folgt mit

$$\underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N}^{DK} = \underline{Z}^T \cdot \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N} \cdot \underline{Z} \quad . \quad (2.115)$$

Die Suche im Raum der transformierten Mehrdeutigkeiten kann grundsätzlich deutlich effizienter durchgeführt werden. Da \underline{Z} invertierbar ist, kann anschließend eine Rücktransformation der Mehrdeutigkeiten erfolgen.

2.3.2.2.2 Qualitätsprüfung

Zunächst erfolgt die Prüfung des Differenzvektors zwischen Fließkomma- und Ganzzahl-Mehrdeutigkeiten. Wenn die Testgröße

$$\left(\underline{X}_{\nabla\Delta N} - \underline{X}_{\nabla\Delta N}^{FIX} \right)^T \cdot \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N}^{-1} \cdot \left(\underline{X}_{\nabla\Delta N} - \underline{X}_{\nabla\Delta N}^{FIX} \right) > \chi_{n,t-\alpha}^2 \quad (2.116)$$

das Quantil der χ^2 -Verteilung mit n Freiheitsgraden (n Mehrdeutigkeiten) und der Sicherheitswahrscheinlichkeit $1-\alpha$ überschreitet, sollte die Mehrdeutigkeitslösung als unstimmig verworfen werden.

Weiterhin kann noch überprüft werden, ob die gefundene Lösung deutlich präziser ist als die zweitbeste Lösung (sog. *Quotiententest*). Die Testgröße

$$\frac{\left(\underline{X}_{\nabla\Delta N} - \underline{X}_{\nabla\Delta N}^{FIX,2} \right)^T \cdot \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N}^{-1} \cdot \left(\underline{X}_{\nabla\Delta N} - \underline{X}_{\nabla\Delta N}^{FIX,2} \right)}{\left(\underline{X}_{\nabla\Delta N} - \underline{X}_{\nabla\Delta N}^{FIX,1} \right)^T \cdot \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta N}^{-1} \cdot \left(\underline{X}_{\nabla\Delta N} - \underline{X}_{\nabla\Delta N}^{FIX,1} \right)} > F_{n,n,t-\alpha} \quad (2.117)$$

soll dabei größer sein als das entsprechende Quantil der F-Verteilung⁵².

Eine komfortable Methode zur Evaluierung der Wahrscheinlichkeit einer korrekten Fixierung der Mehrdeutigkeiten wird dem Anwender in Form der »Erfolgsrate« (*Success Rate*) an die Hand gegeben. Gemäß VERHAGEN und JOOSTEN [2003] sowie TEUNISSEN [2003c] ergibt sich für den Fall der Anwendung sequenzieller Rundung die Gesamtwahrscheinlichkeit zu

⁵² Auf Grund der Tatsache, dass die beiden Summen, aus denen sich der Quotient ergibt, nicht stochastisch voneinander unabhängig sind, sollte in der Praxis dieser Schwellwert noch erhöht werden.

$$P = \prod_{i=1}^n \left[2F\left(\frac{1}{2\sigma_{z_i}}\right) - 1 \right] , \quad (2.118)$$

wobei F die Verteilungsfunktion der normierten Normalverteilung⁵³

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot y^2\right) \cdot dy \quad (2.119)$$

symbolisiert und die Standardabweichung σ_z für die Standardabweichung der Mehrdeutigkeit steht, die über jene $i-1$ vorhergehenden sequenziellen Rundungen erhalten wurde. Sie ergibt sich als Diagonalelement der Matrix \underline{D} , nachdem eine Cholesky-Zerlegung der Form $\underline{L} \cdot \underline{D} \cdot \underline{L}^T$ der dekorrelierten Kovarianzmatrix der Mehrdeutigkeiten vorgenommen wurde. Die Wahrscheinlichkeit für die Lösung unter strenger Beachtung der Minimierungs-Bedingung kann nicht auf einfache Weise berechnet werden, entspricht aber mindestens der Wahrscheinlichkeit für die sequenzielle Rundung oder fällt höher aus, so dass in praktischer Hinsicht obige Formel als untere Grenze - also als pessimistische Abschätzung der Erfolgsrate - angesehen werden darf.

2.3.3 Geometriereduzierter Ansatz

Liegen bereits Näherungspositionen der GPS-Antenne von eingeschränkter Genauigkeit vor, so kann das in Abschnitt 2.3.1 skizzierte Verfahren ohne Verwendung der Streckenmessungen zur Mehrdeutigkeitslösung angewendet werden. Dieses Vorgehen entspricht einer Mischform aus geometriebasierter und geometriefreier Methode. Dazu sei noch einmal auf Tabelle 2.2 verwiesen: Die dritte Gruppe der Linearkombinationen weist zwar eine starke Verstärkung des Ionosphärenfehlers auf, aber $L_{7;9}$ und auch $L_{4;5}$ sowie $L_{3;4}$ reduzieren gleichfalls den Einfluss geometrischer Fehler, d.h. eine ungenaue Position wirkt sich innerhalb bestimmter Grenzen nicht signifikant auf die Mehrdeutigkeiten aus. Gleichzeitig sind die virtuellen Wellenlängen sehr groß, was die Mehrdeutigkeitsfindung vereinfacht. Auf Grund der enormen Verstärkung des Ionosphärenfehlers kann diese Methode freilich nur über kurze Basislinien angewendet werden.

2.3.3.1 Bestimmung über Trägerphasenmessungen

Durch Umstellung der bereits diskutierten Beobachtungsgleichung für die doppelt differenzierten Trägerphasenmessungen erhalten wir

$$\nabla \Delta N_{AB,LK}^{ij} = \frac{\nabla \Delta \rho_{AB,k}^{ij}}{\lambda_{LK}} + \nabla \Delta \delta \phi_{AB,LK,k}^{ij} - \nabla \Delta \phi_{AB,LK,k}^{ij} , \quad (2.120)$$

mit der doppelten Differenz der geometrischen Distanz $\nabla \Delta \rho_{AB,k}^{ij}$, die aus den Satellitenkoordinaten und der Näherungsposition des Rovers berechnet wird.

2.3.3.2 Ausnutzung von Redundanzen

Wird die Mehrdeutigkeitsbestimmung für mindestens zwei Linearkombinationen durchgeführt, bspw. $L_{4;5}$ und $L_{3;4}$, so lassen sich die originären Mehrdeutigkeiten für L_1 und L_2 rekonstruieren:

$$\begin{aligned} \nabla \Delta N_{AB,L1}^{ij} &= 4 \cdot \nabla \Delta N_{AB,L4;5}^{ij} - 5 \cdot \nabla \Delta N_{AB,L3;4}^{ij} \\ \nabla \Delta N_{AB,L2}^{ij} &= 3 \cdot \nabla \Delta N_{AB,L4;5}^{ij} - 4 \cdot \nabla \Delta N_{AB,L3;4}^{ij} \end{aligned} \quad (2.121)$$

⁵³ siehe auch Abschnitt 5.1.2

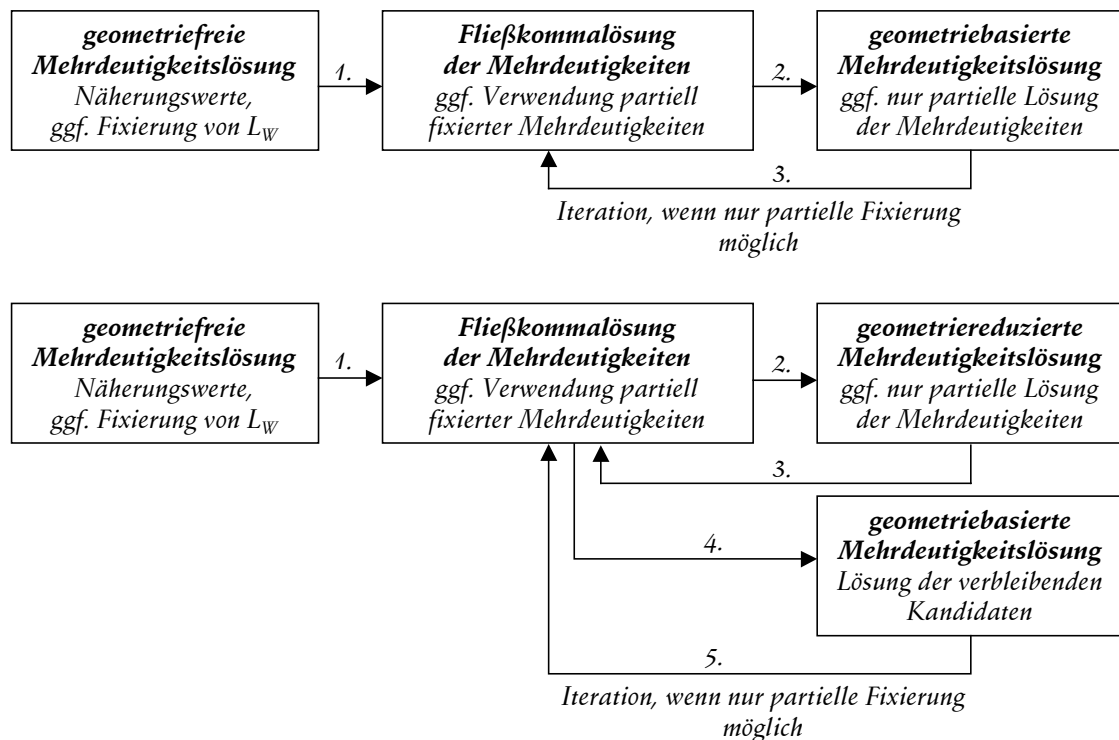


Abbildung 2.2: Darstellung der Lösungsketten zur Bestimmung der Mehrdeutigkeiten.

Wird diese Prozedur für ein zusätzliches virtuelles Signal durchlaufen, bspw. für $L_{7,9}$, so können die originären Mehrdeutigkeiten entsprechend durch weitere Kombinationen redundant ermittelt werden, woraus sich eine Kontrollmöglichkeit bzgl. einer korrekten Fixierung ergibt.

2.3.4 Lösungsstrategien

Abbildung 2.2 veranschaulicht die zwei angewendeten Lösungsketten zur Fixierung von Mehrdeutigkeiten, die sich aus der Kombination der zuvor beschriebenen Methoden ergeben. Am Anfang steht grundsätzlich die geometriefreie Bestimmung der Mehrdeutigkeitsterme, ohne zwingend eine Festsetzung auf die Ganzzahlwerte vorzunehmen, was lediglich bei der *Wide Lane* L_W Chancen auf Erfolg hätte. Vielmehr steht die Bereitstellung von Näherungswerten im Vordergrund.

Anschließend folgt im Rahmen der Blockausgleichung⁵⁴ die Schätzung der Mehrdeutigkeitsparameter als Fließkommazahlen und nachfolgend die Anwendung geometriebasierter Verfahren, zumeist der LAMBDA-Methode. Die Festsetzung der Mehrdeutigkeiten kann so in kurzer Rechenzeit erfolgen, wozu lediglich der Vektor der Fließkomma-Mehrdeutigkeiten mit der zugehörigen Kovarianzmatrix benötigt wird. Grundsätzlich darf im Übrigen aber festgestellt werden, dass die Wahl des konkreten Suchverfahrens in Anbetracht gestiegener Rechenleistungen an Bedeutung verloren hat.

Alternativ kann beim Vorliegen kurzer Basislinien nach der Fließkommallösung die Festsetzung mit der geometriereduzierten Methode erfolgen. Die Attraktivität dieser Methode geht von der geschickten Verknüpfung einer genäherten Positionslösung und einer einfach zu implementierenden Mehrdeutigkeitsbestimmung aus. Verbleibende Mehrdeutigkeiten, die in diesem Schritt nicht fixiert werden konnten, werden an den geometriebasierten Algorithmus übergeben. In jedem Fall können Iterationen durchgeführt werden, wenn zunächst keine vollständige Fixierung des Mehrdeutigkeitsvektors möglich ist. Anschließend kann die Fließkommallösung dann mit Hilfe der partiell festgesetzten Mehrdeutigkeiten verbessert und so die Chance auf die Lösung der verbleibenden Kandidaten erhöht werden.

⁵⁴ siehe auch Abschnitt 2.2.1.3.4

Ganz wesentlich ist im Zusammenhang mit dem Versuch der Mehrdeutigkeitslösung folgende Erkenntnis, insbesondere mit Bezug auf den geometriebasierten Ansatz: Der Erfolg steht und fällt mit einem realistischen stochastischen Modell. Besonders problematisch wirken sich auch systematische Fehler aus. In diesem Sinne soll das nächste Kapitel einen Beitrag zur Verbesserung der Fehler-Modellierung und damit zur Aufstellung realistischerer Eingangsgrößen leisten. In diesem Zusammenhang werden die in Abschnitt 2.3.2.2.2 beschriebenen Testprozeduren um eine Prüfung auf die Wirkung systematischer Fehler erweitert, was einen Gewinn an Zuverlässigkeit für die Mehrdeutigkeitssuche bewirkt.

3. Funktionale und stochastische Modellierung von Fehlern

Höchste Präzision ist in der kinematischen Positionierung in vielen Fällen nur zu erzielen, wenn die Mehrdeutigkeiten der Trägerphasen erfolgreich fixiert werden können. Die Suchverfahren setzen nicht nur Zufallsgrößen voraus, die der Normalverteilung folgen, sondern nutzen als wesentlichen Informationsträger die Kovarianzmatrix der zunächst als Fließkommazahlen bestimmten Mehrdeutigkeiten. Nur wenn diese Matrix realistische Varianzen und Korrelationen enthält, kann die Suche erfolgreich verlaufen. Die Forderung nach einem realistischen stochastischen Modell ist dabei von grundsätzlicher Relevanz, werden die GPS-Ergebnisse bezüglich ihrer Standardabweichungen doch im Allgemeinen als »zu optimistisch« bewertet. In diesem Kapitel sollen die einzelnen für die GPS Positionierung relevanten Fehlerquellen analysiert und in ihrer Bedeutung bewertet werden. Besondere Aufmerksamkeit richtet sich in diesem Zusammenhang auf die atmosphärische Refraktion und den daraus resultierenden Laufzeitverzögerungen in Ionosphäre und Troposphäre, da sie - wie auch von SEEGER [1989] erwähnt - für die in dieser Arbeit angestrebte Ausweitung der Basislinien-Längen zur dominanten Fehlerquelle werden. Besonders kritisch wirken sich in diesem Zusammenhang systematische Fehler aus, die in dieser Arbeit für die relevanten Größen separat abgeschätzt und auch im erweiterten Testmodell für die Zuverlässigkeitsprüfung der Mehrdeutigkeiten benutzt werden.

3.1 Überblick

Tabelle 3.1 stellt die diskutierten Fehlerquellen als Übersicht dar. Grundsätzlich lässt sich eine Unterteilung in instrumentelle Fehler und jener, die aus der Umgebung resultieren, vornehmen. Unter dem Instrument ist jedoch nicht nur der reine GPS-Empfänger mit seinen Bestandteilen, sondern auch die zugehörige Antenne zu verstehen. Weiterhin wird hier auch der Sender (Satellit) mit seiner Antenne dem Gesamtbegriff »Instrument« zugeordnet. Die Zuordnung von Mehrwege-Fehlern durch Reflexionen des Signals können der Klasse der »Umgebungsfehler« intuitiv zugeordnet werden, doch zeigt dieses Beispiel bereits, dass eine eindeutige Zuordnung nicht immer möglich ist, denn KEITH [2000] erwähnt Mehrwege-Effekte, die durch die Empfänger-Hardware - also durch das Instrument - erzeugt werden. Umgekehrt kann das Problem der Antennen-Orientierung auch als Umgebungsfehler interpretiert werden, da es durch die Änderung der relativen Geometrie zwischen Empfänger- und Sender-Antenne entsteht.

3.2 Methodik

Nach PELZER [1985] konvergiert der arithmetische Mittelwert \bar{x} einer Beobachtungsreihe x_1, x_2, \dots, x_n mit zunehmendem Stichprobenumfang gegen den Erwartungswert

<i>Fehlerquelle</i>			
<i>primär durch das Instrument bedingt</i>		<i>aus der Umgebung resultierend</i>	
3.3.1	Messrauschen der Trägerphasen	3.4.1	Phasensprünge (»Cycle Slips«)
3.3.2	Laufzeitverzögerungen in der Hardware	3.4.2	Mehrweg und Signalbeugung
3.3.2.1	Inter-Frequency Biases	3.4.3	Relativistische Effekte
3.3.2.2	Inter-Channel Biases	3.4.4	Bewegungskorrektur
3.3.2.3	P-C/A-Kode Biases	3.4.5	Gezeiten der festen Erde
3.3.3	Antenne	3.4.6	Ozeanische Auflasten
3.3.3.1	Exzentrizität	3.4.7	Erdrotation, Polbewegung
3.3.3.2	Phasenzentrum	3.4.8	Satellitenbahn
3.3.3.3	Orientierung	3.4.9	Atmosphärische Refraktion
3.3.4	Synchronisation der Daten	3.4.9.1	Ionosphäre
		3.4.9.2	Troposphäre und Stratosphäre
		3.4.9.2.1	Hydrostatische Verzögerung
		3.4.9.2.2	Feuchte Laufzeitverzögerung

Tabelle 3.1: Übersicht über die angesprochenen Fehlerquellen, unterteilt in Unsicherheiten, die primär instrumentell bedingt sind, also auf Sender (Satellit), Empfänger oder die zugehörigen Antennen zurückgeführt werden können, sowie solche, die sich aus der Umgebung der Antenne ergeben.

$$E\{x\} = \mu_x, \quad (3.1)$$

d. h. die Wahrscheinlichkeit P , dass

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\{|\bar{x} - \mu_x| > \delta\} = 0 \quad \wedge \quad \delta > 0 \quad (3.2)$$

die Differenz zwischen Mittelwert und Erwartungswert eine bestimmte Fehlergrenze δ überschreitet, konvergiert gegen null. Allerdings wäre es ein Irrtum, Erwartungswert und wahren Wert als identische Größen aufzufassen, denn

$$\mu_x = \tilde{x} + \Delta_x \quad (3.3)$$

der Erwartungswert entspricht dem um einen systematischen Fehler Δ_x verfälschten wahren Wert \tilde{x} . Nur wenn ein systematischer Fehler ausgeschlossen werden kann, fallen Erwartungswert und wahrer Wert zusammen. Im Rahmen terrestrischer Netzmessungen können systematische Effekte bei sauberer Kalibrierung der Instrumente, exakter Zentrierung, etc. weitgehend ausgeschlossen werden, bei GPS-Messungen nur in eingeschränktem Maße. Aus diesem Grund kommt im Rahmen dieser Arbeit auch der *Fortpflanzung systematischer Fehler* besondere Bedeutung zu.

Ein geeignetes Maß für die Streuung ergibt sich aus den zufälligen Abweichungen ε in Form der empirischen Varianz

$$s_\varepsilon^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \quad \wedge \quad \varepsilon_i = x_i - \mu_x \quad (3.4)$$

bei bekanntem Erwartungswert, der Mangels besserer Kenntnis in der Praxis durch den Mittelwert ersetzt werden kann, so dass sich aus den Verbesserungen v die Varianz

$$s_v^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n v_i^2 \quad \wedge \quad v_i = \bar{x} - x_i \quad (3.5)$$

ergibt. Liegen auf Grund langjähriger Erfahrung, durch Vergleich mit Messungen übergeordneter Genauigkeit oder auch aus theoretischen Überlegungen sehr exakte Informationen über die Varianzen vor, so können die empirischen Standardabweichungen s durch die theoretischen σ ersetzt werden.

Die in diesem Abschnitt erarbeiteten Grundlagen lassen sich unmittelbar mit wichtigen Begriffen der Statistik in Verbindung bringen, die inzwischen auch im Bereich der Navigation weite Akzeptanz gefunden haben:

Präzision: Die Präzision ist ein Maß für die Übereinstimmung zwischen unabhängigen Messergebnissen unter festen Bedingungen. Liegen also mehrere Messwerte dicht beieinander, so hat die Messmethode eine hohe Präzision, die in unserem Fall durch s_v charakterisiert wird. Eine hohe Präzision bedeutet aber noch nicht, dass die gemessenen Werte auch *richtig* sind.

Richtigkeit: Die Richtigkeit ist ein Maß für die Übereinstimmung zwischen dem aus einem großen Datensatz erhaltenen Mittelwert, also \bar{x} , und dem anerkannten Referenzwert, in diesem Abschnitt als μ_x bezeichnet. Wenn also der Mittelwert aus vielen Messungen gut mit dem wahren Wert übereinstimmt, so ist die Richtigkeit hoch. Die Richtigkeit kann durch die Größe des systematischer Fehlers Δ_x quantifiziert werden.

Genauigkeit: Die Genauigkeit darf nicht mit der Präzision verwechselt werden, sondern ist ein Maß für die Übereinstimmung zwischen dem Messergebnis und dem wahren Wert der Messgröße. Eine hohe Genauigkeit wird somit nur erreicht, wenn Präzision *und* Richtigkeit hoch sind. Die Genauigkeit wird in dieser Arbeit durch s_ε ausgedrückt.

3.2.1 Elimination von Fehlern

Der entscheidende, zur Elimination bedeutender Fehler führende »Kunstgriff« besteht in der Bildung doppelter Differenzen und führt praktisch zum Ausschluss der Satelliten- und Empfängeruhrfehler. Eine Reihe weiterer Fehler wird durch diese Maßnahme zwar nicht vollständig eliminiert, aber doch spürbar reduziert. Weiterhin wird durch Wahl einer geeigneten Linearkombination der L_1 - und L_2 -Messungen der ionosphärische Fehler bereits deutlich reduziert, gleichzeitig weisen beispielsweise die Kombinationen $L_{4;3}$ und $L_{5;4}$ aber noch ausreichend große Wellenlängen auf, die eine Fixierung der Mehrdeutigkeiten prinzipiell noch möglich erscheinen lassen.

3.2.2 Funktionale Modellierung

Die klare Mehrzahl der Fehler kann grundsätzlich in einer deterministischen Weise bestimmt werden, also *funktional* modelliert werden, einige sogar mit übergeordneter Genauigkeit, z. B. die Gezeiten der festen Erde. Die feuchte Komponente der troposphärischen Laufzeitverzögerung hingegen wird grundsätzlich nicht frei von signifikanten Restfehlern sein, doch macht auch hier eine im ersten Schritt vollzogene funktionale Modellierung Sinn.

3.2.3 Stochastische Modellierung

Die nach der deterministischen Bestimmung verbleibenden Restfehler können, sofern sie sich zufällig verhalten, stochastisch modelliert werden, d.h. die Fehler werden in Form von Varianzen zur Bildung der Kovarianzmatrix der Beobachtungen herangezogen. In bestimmten Fällen muss sogar mangels genauerer Informationen eine reine stochastische Modellierung vorgenommen werden, beispielsweise bzgl. der Behandlung der Satellitenorbits während des Durchlaufs durch den Erdschatten (*»Eclipsing Season«*), sofern keine genaueren Informationen über das Rotationsverhalten der Satelliten vorliegen.

3.2.3.1 Fehlerfortpflanzung

Häufig liegen die Varianzen und Kovarianzen nicht bereits im Beobachtungsraum vor, sondern müssen erst in diesen »transformiert« werden. Beispielsweise werden troposphärische Laufzeitverzögerungen zunächst in Zenitrichtung modelliert und anschließend in Richtung des Satelliten mit Hilfe einer geometrischen Abbildungsfunktion umgerechnet. Diese Umrechnung gelingt über die Matrix

$$\underline{F} = \left(\frac{\partial L(\underline{x})}{\partial \underline{x}} \right)_{\underline{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial L_1(\underline{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial L_1(\underline{x})}{\partial x_2} & \dots \\ \frac{\partial L_2(\underline{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial L_2(\underline{x})}{\partial x_2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

die analog der zur Ausgleichung verwendeten Modellmatrix \underline{A} die partiellen Ableitungen der Gleichungen $L_1, 2, \dots, n$ nach den einzelnen Variablen x_i enthält. Die Transformation der Streuungsmaße erfolgt also ebenfalls unter Nutzung einer Taylor-Entwicklung, die bereits nach dem ersten Entwicklungsschritt abgebrochen wird. Die Kovarianzmatrix der Beobachtungen folgt dann in zusammenfassender Darstellung mit

$$\underline{\Sigma}_{LL} = \underline{F} \cdot \underline{\Sigma}_{XX} \cdot \underline{F}^T, \quad (3.7)$$

kann aber in ausführlicherer Darstellung nach SCHWIEGER [1999] - ausgehend von einem erweiterten Elementarfehler-Modell - in die nachfolgend beschriebenen Fehlerarten separiert werden.

3.2.3.2 Nicht-korrelierend wirkende Fehler

Elementarfehler, die sich jeweils nur abgegrenzt auf einzelne Abweichungen auswirken, führen zu keinerlei Korrelationen. Die Kovarianzmatrix eines dieser verschiedenen, nicht-korrelierenden Fehler δ sei die Diagonalmatrix

$$\underline{\Sigma}_{\delta\delta_i} = \begin{bmatrix} \sigma_{\delta_1}^2 & & \\ & \sigma_{\delta_2}^2 & \\ & & \ddots \\ & & & \sigma_{\delta_i}^2 \end{bmatrix}_i \quad (3.8)$$

Für den Fall, dass diese Fehler nicht direkt im Beobachtungsraum vorliegen, wird eine Umrechnung analog zum allgemeinen Beispiel in 3.2.3 über die »Einflussfaktoren«

$$\underline{F}_{\delta_i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial L_1}{\partial \delta_i} \\ \frac{\partial L_2}{\partial \delta_i} \\ \vdots \end{bmatrix}_i \quad (3.9)$$

vorgenommen, wobei wegen der nicht vorhandenen funktionalen Beziehungen nur die Diagonale der Matrix besetzt ist. Die Summe all dieser nicht korrelierend wirkenden Fehler

$$\underline{\Sigma}_{LL\delta} = \sum_{i=1}^{n_\delta} \underline{F}_{\delta_i} \cdot \underline{\Sigma}_{\delta\delta_i} \cdot \underline{F}_{\delta_i}^T \quad (3.10)$$

ergibt den ersten Beitrag zum stochastischen Modell der Beobachtungen.

3.2.3.3 Korrelierend wirkende Fehler

3.2.3.3.1 Funktionale Korrelation

Viele Elementarfehler werden nicht nur auf eine einzige, sondern auf Grund funktionaler Beziehungen auch auf verschiedene andere zufällige Abweichungen einwirken. Der Beitrag sämtlicher korrelierender Fehler ξ mit ihrer Kovarianzmatrix $\underline{\Sigma}_{\xi\xi}$ auf die Kovarianzmatrix der Beobachtungen

$$\underline{\Sigma}_{LL\xi} = \underline{F}_\xi \cdot \underline{\Sigma}_{\xi\xi} \cdot \underline{F}_\xi^T \quad (3.11)$$

bildet das zweite Fragment zur Aufstellung des kompletten stochastischen Modells der Beobachtungen zur Ausgleichung der GPS-Beobachtungen.

3.2.3.3.2 Stochastische Korrelation

Sind die einzelnen Elementarfehler - wie bisher angenommen - nicht voneinander stochastisch unabhängig bzw. kann eine stochastische Trennung bspw. aus Gründen des hohen Aufwandes nicht vorgenommen werden, so bietet sich die Modellierung als stochastisch korrelierende Fehler γ an. Die Kovarianzmatrix (symmetrisch; signalisiert durch unterstrichene Diagonalelemente) dieser Fehler sei

$$\underline{\Sigma}_{\gamma\gamma_i} = \begin{bmatrix} \sigma_{\gamma_1}^2 & \rho_{12} \cdot \sigma_{\gamma_1} \cdot \sigma_{\gamma_2} & \cdots \\ & \underline{\sigma}_{\gamma_2}^2 & \cdots \\ & & \ddots \\ & & & \sigma_{\gamma_i}^2 \end{bmatrix}_i \quad (3.12)$$

symmetrisch, aber voll besetzt, wobei die Kenngrößen mit Hilfe der Zeitreihenanalyse abgeleitet werden können. So kann über die bereits in 2.3.2.1.3 eingeführte Auto-Kovarianzfunktion das zeitliche oder räumliche Korrelations-Verhalten des Prozesses bestimmt werden. Die Kreuzkorrelations-Funktion gibt Aufschluss über die gegenseitigen Abhängigkeiten.

Die Transformation in den Beobachtungsraum folgt wie in Abschnitt 3.2.3.2 mit Hilfe der Matrix

$$\underline{F}_{\gamma i} = \left(\frac{\partial \underline{L}}{\partial \underline{\gamma}} \right)_i, \quad (3.13)$$

wobei wiederum nur die Diagonale besetzt ist, da funktionelle Abhängigkeiten nicht vorhanden sind, sondern in Abschnitt 3.2.3.3.1 verarbeitet wurden. Somit ergibt sich als Summe aller stochastisch korrelierenden Fehler zusammengefasst

$$\underline{\Sigma}_{LL\gamma} = \underline{F}_{\gamma} \cdot \underline{\Sigma}_{\gamma\gamma} \cdot \underline{F}_{\gamma}^T \quad (3.14)$$

der letzte Bestandteil der zum Beobachtungsvektor \underline{L} gehörenden Kovarianzmatrix

$$\underline{\Sigma}_{LL} = \underline{\Sigma}_{LL\delta} + \underline{\Sigma}_{LL\xi} + \underline{\Sigma}_{LL\gamma}, \quad (3.15)$$

welche die zufälligen Fehler der Beobachtungsgrößen beschreibt.

3.2.4 Berücksichtigung systematisch wirkender Fehler

Verschiedene Fehler verhalten sich nicht zufällig, sondern in systematischer Art und Weise. Ob primär stochastisches oder systematisches Verhalten dominiert, kann beispielsweise auch vom betrachteten Zeitintervall abhängig sein. Der durch die Troposphäre bedingte Fehler zeigt über Zeiträume von Wochen und Monaten eher ein zufälliges Verhalten und könnte somit als stochastischer Prozess aufgefasst und nach den Grundsätzen von Abschnitt 3.2.3.3.2 behandelt werden. Über kurze Zeiträume von wenigen Stunden wirkt er hingegen hochgradig systematisch. Da nun aber präzise kinematische Positionierung in den meisten Fällen genau in diesem Zeitfenster stattfindet, erhält die Fortpflanzung systematischer Fehler gesteigerte Bedeutung.

Sei $\underline{\Delta}$ der Vektor der systematischen Fehler, so ergibt sich mit Bezug auf die Beobachtungen

$$\underline{l}_{\Delta} = \underline{F}_{\Delta} \cdot \underline{\Delta} \quad (3.16)$$

unter Nutzung der Funktional-Matrix \underline{F}_{Δ} der Vektor der systematischen Fehler \underline{l}_{Δ} . Dieser wird schließlich über

$$\underline{x}_{\Delta} = (\underline{A}^T \cdot \underline{P} \cdot \underline{A})^{-1} \cdot (\underline{A}^T \cdot \underline{P} \cdot \underline{l}_{\Delta}) \quad (3.17)$$

in den Parameterraum transformiert mit \underline{A} als Modellmatrix und \underline{P} als Gewichtsmatrix.

3.3 Instrumentelle Fehlerquellen

3.3.1 Messrauschen der Trägerphasen

Tabelle 3.2 fasst wesentliche Aussagen dieses Abschnitts zusammen, indem für die Standardabweichungen der nicht differenzierten Trägerphasenmessungen auf L_1 und L_2 repräsentative Mittelwerte für qualitativ hochwertige geodätische Empfänger aufgeführt werden. Zur Ausschaltung von Umgebungsfehlern verwendet BONA [2000] eine Null-Basislinie (*»Zero Baseline«*) und findet folgende, das Empfänger-Rauschen charakterisierende Standardabweichungen für die Trägerphasen:

Empfänger	L_1 Trägerphasen-Rauschen	L_2 Trägerphasen-Rauschen
Trimble 4000 SSI	0,15 mm	0,27 mm
Ashtech Z-XII	0,17 mm	0,34 mm
Trimble 4700/MS 750	0,83 mm	0,95 mm
Leica System 500	0,52 mm	0,98 mm
Leica CRS 1000	0,58 mm	1,7 mm
JPS Legacy	1,3 mm	2,9 mm
DS NP Scorpio 6000	2,1 mm	2,8 mm

Tabelle 3.2: Trägerphasen-Rauschen gemäß Untersuchungen von BONA [2000], sortiert nach den Standardabweichungen der L_2 -Phasenmessungen (JPS: Javad Positioning Systems; DS: Dassault-Sercel; Verwendung von unterschiedlichen, aber herstellereigenen Antennen).

In obiger Tabelle wurde eine Sortierung mit Bezug auf das geringste Rauschen auf L_2 durchgeführt, da in dieser Arbeit häufig L_1 - L_2 -Linearkombinationen verwendet werden und die Präzision dieser virtuellen Signale unter der grundsätzlich schlechteren Tracking-Performance auf L_2 (Fehlen des C/A-Kodes bei gleichzeitiger Verschlüsselung des P-Kodes) leidet und somit primäres Augenmerk genießen sollte. Das Spitzenfeld mit Standardabweichungen von weniger als 0,5 mm (auch auf L_2) führen der Trimble 4000 SSI und Ashtech Z-XII an, gefolgt vom Mittelfeld im Bereich von 0,5 bis 1,0 mm, bestehend aus den Empfängern Trimble 4700 und Leica 500. Die ermittelten Werte für das Javad-System sollten nach eigenen Erfahrungen mit Vorsicht genossen werden: Bei diesem Gerät besteht die Möglichkeit, über mitgelieferte Software relativ einschneidende Änderungen an der Empfänger-Konfiguration vorzunehmen, welche die Tracking-Performance sowohl negativ als auch durchaus sehr positiv beeinflussen können. Insgesamt zeugen die Ergebnisse von einem hohen Stand der Empfänger-Technologie und unterstreichen die eher untergeordnete Rolle des reinen Phasenrauschens für das Fehlerbudget bei der kinematischen GPS Positionierung, das hinter dominanteren Fehlerquellen zurücktritt¹.

Bedeutung bei der Aufstellung des stochastischen Modells kommt der Korrelation zwischen den Phasenmessungen auf beiden Frequenzen zu. Grundsätzlich muss auf Grund des Akquisitionsverfahrens auf L_2 mit einer signifikanten Kreuzkorrelation zwischen den L_1 - und L_2 -Phasen gerechnet werden. Tabelle 3.3 bestätigt diese Annahme, wobei für die Mehrzahl der Empfänger vergleichsweise geringe Korrelationskoeffizienten nahe 0,5 festgestellt werden können. Lediglich der Trimble 4700 bzw. MS 750 weist mit 0,76 eine deutlich erhöhte Korrelation auf und das Gerät von Dassault-Sercel erreicht einen Spitzenwert von 0,97.

Empfänger	Korrelation L_1, L_2	Zeitkorrelation L_1	Zeitkorrelation L_2
Trimble 4000 SSI	0,42	1 s	10 s
Ashtech Z-XII	0,43	1 s	4 s
Trimble 4700/MS 750	0,76	1 s	1 s
Leica System 500	0,54	1 s	1 s
Leica CRS 1000	0,33	1 s	1 s
JPS Legacy	0,44	1 s	4 s
DS NP Scorpio 6000	0,97	1 s	1 s

Tabelle 3.3: Von BONA [2000] festgestellte Kreuzkorrelationen zwischen L_1 und L_2 sowie die Zeitspannen, nach denen die zeitliche Korrelation der L_1 - bzw. L_2 -Trägerphasen ungefähr den Wert 0,0 erreicht.

Für verschiedene Anwendungen kann auch die Auto-Korrelation, also die zeitliche Korrelation der Messungen, von Bedeutung sein². Alle getesteten Empfänger zeigen ein Abklingen der Auto-Korrelation auf einen Wert nahe 0,0 nach bereits einer Sekunde auf L_1 (teilweise sogar weniger). Für

¹ Die hier dargestellten Untersuchungen untersuchen allerdings nicht die Tracking-Performance unter schlechten Ionosphären-Bedingungen. So können Szintillationen zu Phasensprüngen führen. Sind diese nicht fixierbar, so folgt daraus auch eine geringere Genauigkeit der Positionslösung auf Grund schlechterer Bedingungsichte (f/u).

² Ziel bei hochdynamischen Anwendungen sind stochastisch voneinander unabhängige Messwerte, was bei hohen Taktraten über 1 Hz im Wesentlichen auf L_2 bei vielen Empfängern nicht mehr gewährleistet ist.

eine Reihe von Empfängern (Trimble 4700, Leica 500 und 1000 sowie DS Scorpio) gilt eine ähnliche Aussage auch für L_2 . Einen Spitzenwert zeigt der Trimble 4000 SSI mit einer zirka 10fach stärkeren Auto-Korrelation. Die Ergebnisse bzgl. des Leica CRS 1000 Systems auf L_2 entsprechen jenen von GE et al. [2000] publizierten, die für L_1 sogar ein Abklingen auf Nullniveau nach lediglich einer Epoche (0,1 Sekunden) konstatieren.

Bei der Aufstellung des stochastischen Modells müssen grundsätzlich die algebraischen Korrelationen berücksichtigt werden, da die Originalbeobachtungen durch zweifache Differenzbildung in doppelte Differenzen umgerechnet werden, so dass verschiedene dieser abgeleiteten Beobachtungen identische Originalbeobachtungen enthalten werden³.

3.3.2 Laufzeitverzögerungen in der Hardware

Die abgestrahlten Signale erfahren nach WÜBBENA [1991] eine Laufzeitverzögerung in den elektrischen Schaltkreisen des Satelliten i und Empfängers A . Dieser kombinierte Fehler kann für L_i mit der Lichtgeschwindigkeit c geschrieben werden als

$$\delta S_{A[HWB,L_i]}^i = -c \cdot \{(\delta b_{A;L_i} + \delta b_{A;L_i}^{ch\{i\}}) + \delta b_{L_i}^i\} \quad , \quad (3.18)$$

wobei unter $ch\{i\}$ der zum Verfolgen (»Tracken«) des Signals von Satellit i benutzte Kanal des Empfängers verstanden wird; δb_A sei der auf allen Kanälen je Frequenz konstante Anteil des Empfänger-Biases.

3.3.2.1 Systematische Fehler zwischen den Frequenzen

Auf Grund systematischer Fehler zwischen den Signalen von den beiden Trägerwellen kommt es zu dem sog. »Inter-Frequency Bias«. Dieser Offset ist in dieser Arbeit nicht von Bedeutung, denn in den doppelten Differenzen

$$\nabla \Delta S_{AB[HWB,L_i]}^{ij} = -c \cdot \{(\delta b_{B;L_i}^{ch\{j\}} - \delta b_{A;L_i}^{ch\{j\}}) - (\delta b_{B;L_i}^{ch\{i\}} - \delta b_{A;L_i}^{ch\{i\}})\} \quad (3.19)$$

werden die je Satellit und Empfänger konstanten Fehler δb^i und δb_A eliminiert. Allerdings werden häufig zur Untersuchung der Ionosphäre undifferenzierte Beobachtungen gewählt, so dass in diesem Falle dann eine Bestimmung bzw. Mitschätzung dieser Fehlergrößen vorgenommen werden muss⁴.

3.3.2.2 Systematische Fehler zwischen den Kanälen

In den Doppel-Differenzen verbleiben somit nur noch die sog. »Inter-Channel Biases«, die seit der Ablösung der alten GPS-Empfänger mit Multiplex-Technologie durch Geräte mit einer Reihe von parallelen Hardware-Kanälen relevant wurden. Allerdings dürfen die Größenordnungen dieser Unsicherheiten in heutigen hochwertigen Empfängern als untergeordnet eingestuft werden, zumal eine geräte-interne Selbst-Kalibrierung sehr einfach möglich ist, indem ein identischer Satellit auf mehreren Kanälen gleichzeitig verfolgt wird und die relativen Unterschiede zwischen den Laufzeiten bestimmt werden.

3.3.2.3 Systematische Fehler zwischen C/A- und P₁-Kode-Strecken

JEFFERSON u. a. [2001] berichten über systematische Fehler zwischen Streckenmessungen, die über den C/A-Kode abgeleitet werden, und den P₁-Strecken, die Kode-freie Empfänger wie beispielsweise der Ashtech Z-XII messen. Ohne genaue Ursachen zum Auftreten dieser Fehler - die Werte bis zu ca. 0,2 m bei häufig nur schwacher Signifikanz erreichen - anzuführen, erwähnen die Autoren doch ihre Satelliten-Abhängigkeit und empfehlen, soweit möglich, die einheitliche Verwendung von P₁-Strecken in Netzwerken unterschiedlicher Empfänger. Streckenmessungen spielen im Rahmen des hier

³ die Beobachtungen zum Referenzsatelliten; siehe auch SANTOS u.a [1997], SCHÜLER [2001, S. 99f]

⁴ siehe bspw. auch GAO u.a. [2002], SARDON u.a. [1994] sowie WILSON u.a. [1993]

verwendeten Algorithmus eine eher untergeordnete Rolle und werden im Wesentlichen zur Bestimmung von Näherungspositionen benutzt. Da aber auch eine Schätzung des Ionosphärenfehlers über Strecken-Trägerphasen-Kombinationen erfolgt, könnte dieser Fehler relevant sein. Unter der Annahme der Satelliten-Abhängigkeit kann jedoch im Modell der doppelten Differenzen ebenso wie in 3.3.2.1 von der Elimination des Fehlers ausgegangen werden.

3.3.3 Antenne

Die Antenne als Bestandteil des Empfangssystems und des Senders muss ebenfalls in die Fehlerbetrachtungen einbezogen werden. In diesem Zusammenhang werden die drei Aspekte der *Exzentrizität*, der *Unterschiede und Variationen des Phasenzentrums* sowie das Problem der gegenseitigen Änderung der *Antennen-Orientierung* diskutiert.

3.3.3.1 Exzentrizität

Soll die Positionsbestimmung mit Bezug auf Punktfestlegungen erfolgen, so ist eine eventuelle Exzentrizität zwischen Bezugspunkt und geometrischem Antennenzentrum zu berücksichtigen. Für diese Informationen sind im RINEX-Format entsprechende Metadaten-Felder vorgesehen, die auf einfache Weise eine Aufstellung des Korrekturvektors im lokalen topozentrischen System zulassen

$$\underline{\Delta x}_{AE} = (\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta h)^T \quad (3.20)$$

mit den Exzentrizitäten in Nord- (Δx), Ost- (Δy) und in radialer (Δh) Richtung. Eine Transformation in globale kartesische Koordinatendifferenzen kann mit Hilfe der Matrix

$$\underline{C}_L^E = \begin{pmatrix} -\sin\varphi \cdot \cos\lambda & -\sin\lambda & \cos\varphi \cdot \cos\lambda \\ -\sin\varphi \cdot \sin\lambda & \cos\lambda & \cos\varphi \cdot \sin\lambda \\ \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

geschehen, wobei der Index *E* für »erdfest« (global und kartesisch) und *L* für »lokal« (geodätisches Koordinatensystem) steht und damit die Transformationsrichtung (vom lokalen in das erdfeste System) angibt⁵. Die Matrix kann bei Kenntnis der ellipsoidischen Breite φ und Länge λ aufgestellt werden.

Wenn sich der Träger in Bewegung befindet, liegen die Exzentrizitäts-Informationen zunächst nur in einem körperfesten System *B* vor, und es muss zunächst eine Transformation in das lokale geodätische System *L* mit Hilfe der Rotationsmatrix

$$\underline{C}_B^L = \begin{pmatrix} \cos\psi \cdot \cos\theta & \cos\psi \cdot \sin\theta \cdot \sin\phi - \sin\psi \cdot \cos\phi & \cos\psi \cdot \sin\theta \cdot \cos\phi + \sin\psi \cdot \sin\phi \\ \sin\psi \cdot \cos\theta & \sin\psi \cdot \sin\theta \cdot \sin\phi + \cos\psi \cdot \cos\phi & \sin\psi \cdot \sin\theta \cdot \cos\phi - \cos\psi \cdot \sin\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta \cdot \sin\phi & \cos\theta \cdot \cos\phi \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

erfolgen. Zu diesem Zweck werden vollständige Lageinformationen in Form der Längsneigung θ (*Nickwinkel*) und Querneigung ϕ (*Rollwinkel, Hängewinkel*) sowie im Allgemeinfall auch das Azimut ψ benötigt.

Im Allgemeinfall darf die Bestimmung der Exzentrizitäten bei den verwendeten Referenzstationen als unkritisch bezeichnet werden. Allerdings werden je nach verwendeter Vermessungstechnik Restunsicherheiten bleiben, die dann systematisch wirken werden. Neben dieser »Zentrierunsicherheit« stellt sich bei den Basisstationen in diesem Zusammenhang weiterhin die Frage nach der Stabilität des Pfeilers. So können im weniger stabilen Fall, bspw. bei Einwirkungen durch den Wind, zu zusätz-

⁵ Zur Definition der verwendeten Koordinatensysteme sowie zur Aufstellung der Rotationsmatrizen gemäß den hier verwendeten Notationen siehe SCHÜLER [1997, Tab. 3.1 und Abschnitte 3.1.2ff] bzw. KLEINSCHMIDT [1989] und KNICKMEYER [1996].

lichem Rauschen führen, oder durch Sonneneinstrahlung kann es zu dem bekannten Phänomen der Pfeilerdrehung kommen, was in Form einer stochastischen Modellierung Berücksichtigung finden kann.

Für den bewegten Träger kann die Ungenauigkeit der Exzentrizitäten zu einem dominierenden Fehlereinfluss werden⁶, die sich hier dann auch als Funktion der Lage- und Richtungswinkel bzw. deren Standardabweichungen ergibt.

Bei der kinematischen Positionierung sind eventuelle Exzentrizitäten der verwendeten Referenzstationen nicht von Bedeutung, da maßgeblich die Koordinaten des Antennenreferenzpunktes interessieren, die - sofern an der Station keine Änderungen durch Austausch oder Versetzung vorgenommen werden - ohne Probleme und ohne Kenntnis von Exzentrizitäten durch eine statische GPS-Netzanalyse ermittelt werden können. Bei verschiedenen Anwendungen tritt diese Problematik auch bzgl. des Rovers in den Hintergrund⁷.

Sofern von Seiten der Referenzstationen keine Probleme zu erwarten sind, stellt die Exzentrizität allgemein gesprochen ein Problem dar, das vom Prozess der eigentlichen GPS-Datenanalyse, bei welcher zunächst nur die Position der GPS-Antenne ermittelt wird, entkoppelt und in einem anschließenden Arbeitsschritt behandelt werden kann. Unsicherheiten in der Exzentrizität stellen damit grundsätzlich keine Belastung mit Bezug auf die Prozessierungsschritte 1 bis 5 (siehe Abbildung 2.1) dar, führen also auch zu keinen Komplikationen bei der Mehrdeutigkeitsbestimmung.

3.3.3.2 Phasenzentrum

Der Referenzpunkt einer Antenne und das tatsächliche Phasenzentrum werden grundsätzlich voneinander abweichen. Dieser Unterschied muss bei präzisen Anwendungen berücksichtigt werden. In diesem Sinne kommt der Kalibrierung der Antennen große Bedeutung zu, der sich inzwischen internationale, nationale und regionale Organisationen angenommen haben. So stellen der International GPS Service (IGS) ebenso wie der National Geodetic Service (NGS, USA) Kalibriertabellen zur Verfügung.

Nach ROTHACHER und SCHMID [2002] stehen drei Hauptmethoden zur Verfügung, um GPS-Empfängerantennen zu kalibrieren, nämlich die (a) *relative Feldkalibrierung* mit Hilfe von GPS-Daten, die auf kurzen und mit übergeordneter Genauigkeit bekannten Basislinien gesammelt werden, (b) die *absolute Feldkalibrierung*, bei der ein Roboterarm zur Drehung und Kippung der GPS-Antenne genutzt wird und (c) *Laborverfahren* in Form von Messungen in einem mikrowellenfreien Raum (*anechoic chamber*). Die Autoren konstatieren generell eine gute Übereinstimmung zwischen den Resultaten der einzelnen Verfahren.

In dieser Arbeit werden die Kalibriertabellen von IGS und NGS verwendet⁸, die gewissermaßen zum Standard geworden sind. Die Modellierung wird dabei unterteilt in einen konstanten Offset zwischen dem Referenzpunkt der Antenne und dem mittleren Phasenzentrum, sowie in eine Korrekturfunktion in Abhängigkeit von der Elevation. Azimut-Abhängigkeiten, wie sie von MENGE u.a. [1998] ebenfalls bestimmt und vorgeschlagen wurden, haben bislang noch keine verstärkte Anwendung innerhalb der IGS- oder EUREF-Gemeinde gefunden. Sie werden im Rahmen dieser Arbeit in erster Linie deshalb nicht einbezogen, da sich im kinematischen Modus die Orientierung der Antenne häufig ständig ändert⁶, ohne dass selbst mit ausreichender Genauigkeit erfasst wird.

3.3.3.2.1 Antennenphasenzentrums-Offset

Die Kalibriertabellen geben analog zur vorhergehend beschriebenen Berücksichtigung der Exzentrizität die Differenzvektoren zwischen Referenzpunkt und mittlerem Phasenzentrum im lokalen geodätischen System

⁶ siehe dazu auch Kapitel 6

⁷ siehe dazu auch Kapitel 7

⁸ zur Dokumentation des Formats siehe MADER [1999]

Bezeichnung der Antenne	$\Delta x_{REL,L2/L1}$	$\Delta x_{ABS,L2/L1}$	$\Delta y_{REL,L2/L1}$	$\Delta y_{ABS,L2/L1}$	$\Delta h_{REL,L2/L1}$	$\Delta h_{ABS,L2/L1}$
ASH701945B_M SNOW	0,6	1,3	0,5	0,6	-16,9	-27,8
NOV600	-1,5	-0,8	0,7	0,8	-1,3	-22,2
TRM14532.00	1,2	1,9	-1,9	-1,8	1,2	-9,7
TRM5800	1,1	0,7	3,1	3,2	8,1	-2,8

Tabelle 3.4: Differenzen L_1 - L_2 [mm] zwischen den Phasenzentren der im Rahmen dieser Arbeit vorrangig verwendeten Antennen für die einzelnen Komponenten nach den Kalibriertabellen des NGS⁹. Die Ergebnisse aus der relativen wurden jenen aus der absoluten Kalibrierung gegenübergestellt. (ASH701945B_M: Choke-Ring-Antenne mit Radome, Referenzstation IF1A am Institut für Erdmessung und Navigation, Geb. 62A; NOV600: NovAtel GPS 600, Pinwheel Technologie, verwendet während des ENVISAT-Projektes¹⁰; TRM 14532: Ground-plane Antenne zum Trimble 4000 SSE, als Rover während des BALTIMOS-Projektes¹¹ und anderer Untersuchungen verwendet; TRM5800: integrierte Antenne des Trimble 5800 RTK Systems, für verschiedene Experimente im Rahmen dieser Arbeit als Rover eingesetzt)

$$\begin{aligned}\underline{\Delta x}_{PCV[L1]} &= (\Delta x_{PCV[L1]} \quad \Delta y_{PCV[L1]} \quad \Delta h_{PCV[L1]})^T \\ \underline{\Delta x}_{PCV[L2]} &= (\Delta x_{PCV[L2]} \quad \Delta y_{PCV[L2]} \quad \Delta h_{PCV[L2]})^T\end{aligned}\quad (3.23)$$

an, wobei für jede Frequenz ein separater Offset zur Anwendung kommt. Tabelle 3.4 stellt die Unterschiede zwischen den Phasenzentren von L_2 und L_1 dar und vergleicht relative mit absoluten Kalibrierergebnissen.

Abgesehen vom Model *TRM5800* sind die Unterschiede der horizontalen Komponenten zwischen L_1 und L_2 mit weniger als 2 mm relativ gering, während in radialer Richtung bei *ASH701945B_M* mehr als 1,5 cm Unterschied (relative Kalibration) und bei *TRM5800* immerhin fast 0,8 cm festgestellt wurden. Da bei vielen kinematischen Anwendungen ebenso wie bei der Berechnung der Exzentrizitäten - die Phasenzentrums-Korrektur ist letztlich auch eine solche - die Orientierung und Neigung der Antenne zu berücksichtigen ist, ergibt sich zur Reduktion dieses Fehlereinflusses zunächst die Forderung nach der Wahl von Antennen, die bereits von Seiten des Herstellers nur geringe Offsets aufweisen bzw. möglichst geringe Unterschiede zwischen L_1 und L_2 . In diesem Zusammenhang fallen die großen Diskrepanzen zwischen den aus absoluter und jenen aus relativer Kalibration stammenden Ergebnisse auf, die häufig um 1 cm in radialer Richtung voneinander abweichen, teilweise auch mehr. Im Rahmen der hier durchgeführten Auswertungen werden die Ergebnisse der relativen Kalibrierung verwendet, da die absoluten Kalibriertabellen vergleichsweise neu sind und noch keine ausreichende Evaluation erfolgt ist.

Eine ähnliche Korrektur muss nach FLIEGEL u.a. [1992] auch bzgl. der Satellitenpositionen vorgenommen werden, da sich die meisten Orbitprodukte im SP3-Format auf das Massenzentrum beziehen, das bei den Block IIA-Satelliten ca. 1 m vom Phasenzentrum der Sendeantenne entfernt liegt, nach SCHÜLER [2001, Abschnitt 2.4.4] bei Block IIR-Satelliten jedoch nur noch im Bereich weniger Zentimeter liegt und somit in Zukunft kaum mehr einer Modellierung bedarf.

3.3.3.2.2 Korrekturfunktion in Abhängigkeit vom Elevationswinkel

Die Berücksichtigung einer Korrektur als Funktion der Elevation erfolgt durch stückweise lineare Terme, wobei die Stützpunkte in den Kalibriertabellen in 5°-Abständen angegeben werden. Tabelle 3.5 gibt einen Überblick über minimale und maximale Korrekturen.

Bei den Antennen sind im Allgemeinen die Korrekturterme aus der absoluten Kalibration geringer als jene aus der relativen, abgesehen von der Choke-Ring-Antenne *ASH701945B_M*, die einen Dorne-

⁹ Bezug unter <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/index.shtml> (11. Mai 2004)

¹⁰ siehe Kapitel 6

¹¹ siehe Kapitel 7

Bezeichnung der Antenne	$\Delta\phi_{REL,L1}$ min./ max.	$\Delta\phi_{ABS,L1}$ min./ max.	$\Delta\phi_{REL,L2}$ min./ max.	$\Delta\phi_{ABS,L2}$ min./ max.
ASH701945B_M SNOW	0,0 mm 0,3 mm	0,2 mm 8,1 mm	0,0 mm 0,3 mm	0,2 mm 5,4 mm
NOV600	0,7 mm 8,1 mm	0,1 mm 3,6 mm	0,2 mm 3,6 mm	0,1 mm 1,7 mm
TRM14532.00	5,4 mm 23,4 mm	5,2 mm 20,5 mm	0,7 mm 5,2 mm	0,6 mm 5,5 mm
TRM5800	1,6 mm 10,9 mm	1,4 mm 6,9 mm	0,4 mm 7,3 mm	0,6 mm 2,2 mm

Tabelle 3.5: Minimale und maximale Korrekturwerte (ohne Vorzeichen) aus relativen (REL) und absoluten (ABS) Kalibrierungen in einem Elevationsfenster von 10° bis 85°.

Margolin Dipol ähnlich jenem enthält, der bei der relativen Kalibration als Referenz dient, d.h. willkürlich mit Nullwerten versehen wird - insofern sind die höheren Werte aus der Absolut-Kalibrierung nicht verwunderlich.

3.3.3.2.3 Beeinflussung durch äußere Effekte

EMARDSON u.a. [1998] weisen darauf hin, dass auch Veränderungen an den Antennen Einfluss auf das Phasenzentrum haben können, z. B. die Verwendung von Radomen. Diesem Umstand wird inzwischen durch individuelle Kalibrierung der einzelnen Antennen-Varianten eines Herstellers Rechnung getragen. Allgemein werden Beeinflussungen des Phasenzentrums auf Grund von (leitfähigen) Materialien in der Umgebung einer Antenne nach TRANQUILLA [1986] als »Antenna Imaging« Effekte bezeichnet. Weiterhin weisen KANIUTH, VETTER [2004] auch auf den Einfluss der Schneebedeckung hin, der in ungünstigen Fällen im Bereich weniger Zentimeter liegen kann, wobei aber keine ausreichende physikalische Begründung genannt wird, so dass die bei Referenzstationen beobachteten Effekte u. U. auch auf Grund der höheren Signaldämpfung oder einer Kombination aus Signaldämpfung und Veränderung des Phasenzentrums bewirkt sein könnten. In diesen Fällen sollten die Daten der betroffenen Zeiträume - wenn möglich - nicht benutzt oder durch entsprechende stochastische Modellierung abgewichtet werden.

Die nach der funktionalen Behandlung der Phasenzentrums-Problematik verbleibenden Restfehler treten im Allgemeinen bei längeren Basislinien hinter den dominierenden Effekten wie der atmosphärischen Refraktion zurück. Bei kürzeren Entfernungen kann die Benutzung von Antennen gleichen Typs und ggf. gleicher Serie zu einer deutlichen Entschärfung der Problematik führen.

3.3.3.3 Orientierung (»Phase Wind-Up«)

Da es sich bei den vom GPS Satelliten gesendeten Signalen um zirkular polarisierte elektromagnetische Wellen handelt, hängen die beobachteten Trägerphasen von der Orientierung der Sende- und Empfangsantenne zueinander ab. WU u. a. [1993] halten diesen auch als *Phase Wind-Up* bekannten Effekt bei kurzen Basislinien für vernachlässigbar gering, quantifizieren ihn bei extrem langen Entfernungen (4000 km) und Verwendung von doppelten Differenzen aber mit bis zu 4 cm. SCHÜLER [2001] stellt den Korrektur-Algorithmus ausführlich dar, der auch allgemein unter der Voraussetzung eingesetzt werden kann, dass zwischen zwei aufeinander folgenden Epochen die Drehungen der Antennen kleiner als 180° bleiben. Während in statischen Netzen die Änderung in der Orientierung maßgeblich durch die Bewegung der GPS-Satelliten relativ zur Erde verursacht wird, tritt bei kinematischen Messungen häufig das Problem auf, dass die Orientierung der Antenne hier nur mit ungenügender Näherung bekannt ist. Die Berücksichtigung dieses Effektes erfolgt in dieser Arbeit nicht, da die Basislinien zumeist erheblich unter dem zuvor angegebenen Wert liegen. Eine funktionale Modellierung wäre ohnehin nur möglich, wenn gleichsam ein AHRS (*Attitude and Heading Referenzsystem*) oder vergleichbares Instrumentarium mitgeführt würde¹².

¹² Während des in Kapitel 6 dargestellten ENVISAT-Projektes wurden zwar die Lagewinkel ermittelt, nicht jedoch die Orientierung in Form des Azimuts bestimmt.

3.3.4 Synchronisation der Daten

Eine wirksame Elimination der Satelliten- und Empfängeruhrfehler in doppelten oder dreifachen Differenzen - wie in Kapitel 2 beschrieben - kann nur erfolgen, wenn sich alle Messungen auf einen identischen Zeitpunkt beziehen. Auf Grund des Empfängeruhrfehlers kann der Empfänger aber den Zeitpunkt nicht exakt bestimmen¹³, so dass eine Synchronisationskorrektur erfolgen muss. In Anlehnung an ROTHACHER und MERVART [1996] kann die Synchronisations-Korrektur für doppelte Differenzen mit

$$\begin{aligned} -\nabla \Delta S_{AB[SYNC]}^{ij} &= \left(\frac{dS_B^i}{dt} \cdot \delta t_B - \frac{dS_A^i}{dt} \cdot \delta t_A \right) - \left(\frac{dS_B^j}{dt} \cdot \delta t_B - \frac{dS_A^j}{dt} \cdot \delta t_A \right) \\ &= \left(\frac{dS_B^i}{dt} - \frac{dS_B^j}{dt} \right) \cdot \delta t_B - \left(\frac{dS_A^i}{dt} - \frac{dS_A^j}{dt} \right) \cdot \delta t_A \end{aligned} \quad (3.24)$$

angegeben werden, wobei δt den Empfängeruhrfehler und dS/dt die Geschwindigkeit des jeweiligen Satelliten charakterisiert. Die funktionale Modellierung kann dabei in praktischer Hinsicht als fehlerfrei betrachtet werden, denn bei einer Genauigkeit von $1 \mu s$ für den Uhrfehler verbleiben nur noch Restfehler im Bereich von 1 mm - die tatsächliche Genauigkeit des Uhrfehlers aus nicht-differenzierten Streckenmessungen ist gegenwärtig ungefähr um mindestens eine Zehnerpotenz präziser.

3.4 Aus der Umgebung resultierende Fehler

Die Trennung in instrumentelle Fehler und Umgebungsfehler ist nicht immer eindeutig. Hier werden primär den Umgebungsfehlern auch die Phasensprünge und der Mehrweg zugerechnet. Neben einer kurzen Diskussion der linearen Bewegung sowie der Gezeiten und Erdrotation folgen die über größere Distanzen maßgeblichen Einflüsse der Satellitenbahn und insbesondere der atmosphärischen Refraktion, die wegen ihrer Bedeutung am ausführlichsten behandelt werden soll.

3.4.1 Phasensprünge («Cycle Slips»)

Phasensprünge entstehen beispielsweise durch (kurzzeitige) Sichtverdeckungen, aber auch durch ionosphärische Szintillationen. Bei der Mehrzahl der Empfänger können nur ganzzahlige Sprünge auftreten, die theoretisch fixiert werden könnten, wenn man sie exakt quantifizieren könnte. An dieser Stelle wird dieser Versuch nicht unternommen, da er nur bei relativ langsamen Bewegungen und geringen Beschleunigungen Aussicht auf Erfolg hat, wohingegen ein falsch fixierter Cycle Slip als grober Fehler sehr negative Auswirkungen auf die Positionierung hätte. Aus diesem Grunde beschränken sich die Bemühungen auf eine sichere Detektion der Sprünge, wobei die betroffene Mehrdeutigkeits-Kombination anschließend in der Ausgleichung als neuer Schätzparameter eingeführt wird.

3.4.1.1 Vergleich von Strecken- und Phasenmessungen

Die bereits im Abschnitt 2.3.2.1 angesprochene Kombination von Strecken- und Trägerphasen kann als erster Schritt bei der Detektion von Phasensprüngen genutzt werden. Die Differenz (als Beispiel wird hier nur L_i verwendet)

$$S_{A,L_i,k}^i - \phi_{A,L_i,k}^i \cdot \lambda_{L_i} = 2 \cdot \delta S_{A,L_i,lon,k}^i + \lambda_{L_i} \cdot N_{A,L_i}^i \quad (3.25)$$

¹³ Diese Aussage gilt inzwischen nur noch für ältere Empfänger, da moderne Geräte, von Ausnahmen wie dem Trimble 5800 einmal abgesehen, intern den im Rahmen der Einzelpositionsbestimmung erhaltenen Zeitfehler zur Nachführung ihrer Uhr benutzen (die bei bestimmten Modellen allerdings auch vom Nutzer wieder deaktiviert werden kann).

ist frei von Geometrie, Uhrfehlern und Troposphäre, enthält aber bei Verwendung von Einfrequenzdaten noch die ionosphärische Laufzeitverzögerung in doppelter Stärke. Zu zwei aufeinander folgenden Zeitpunkten ergeben sich dann die Größen

$$\begin{aligned} & (S_{A,L,t,k}^i - \phi_{A,L,t,k}^i \cdot \lambda_{L,t}) - (S_{A,L,t,k+t}^i - \phi_{A,L,t,k+t}^i \cdot \lambda_{L,t}) \\ &= (2 \cdot \delta S_{A,L,t,lon,k}^i + \lambda_{L,t} \cdot N_{A,L,t}^i) - (2 \cdot \delta S_{A,L,t,lon,k+t}^i + \lambda_{L,t} \cdot N_{A,L,t}^i) \end{aligned} \quad (3.26)$$

die sich unter der Voraussetzung

$$\delta S_{A,L,t,lon,k}^i \approx \delta S_{A,L,t,lon,k+t}^i \quad (3.27)$$

bei einem Freisein von einem Phasensprung zu

$$(S_{A,L,t,k}^i - \phi_{A,L,t,k}^i \cdot \lambda_{L,t}) - (S_{A,L,t,k+t}^i - \phi_{A,L,t,k+t}^i \cdot \lambda_{L,t}) \approx 0 \quad (3.28)$$

vereinfachen, wohingegen ein Phasensprung ΔN in Epoche $k+t$ diese Testgröße auf

$$(S_{A,L,t,k}^i - \phi_{A,L,t,k}^i \cdot \lambda_{L,t}) - (S_{A,L,t,k+t}^i - \phi_{A,L,t,k+t}^i \cdot \lambda_{L,t}) \approx \lambda_{L,t} \cdot \Delta N_{A,L,t}^i \quad (3.29)$$

verändert. Ein Phasensprung liegt also vor, wenn ein bestimmter Schwellwert überschritten wird. Zwar konnte die Messgenauigkeit der Strecken inzwischen verbessert werden, doch liegt ihr Rauschniveau trotzdem noch jenseits der Wellenlänge der Trägerphasen und wird durch zeitlich variierende Umwelteinflüsse wie Mehrwege weiter verschlechtert. Aus diesem Grund kann diese Methode nur als erster Schritt verstanden werden, der sicherlich eine Reihe von Situationen richtig erfasst, bei sehr kleinen Phasensprüngen jedoch versagen wird.

3.4.1.2 Differenz-Filter

Grundsätzlich können die Differenzen der Phasenmessungen zur vorhergehenden Epoche als Testgrößen verwendet werden. Sie ändern sich jedoch selbst im statischen Fall auf Grund der Bewegung der Satelliten. Um die Sprünge zuverlässig zu detektieren, muss deshalb die Implementierung eines Differential-Filters höherer Ordnung erfolgen. In diesem Fall wird ein Filter 4. Ordnung skizziert, bei dem in 4 aufeinander folgenden Schritten die Differenzen der einzelnen Testgrößen ermittelt werden. Betrachten wir eine Zeitreihe mit 8 aufeinander folgenden Phasenmessungen $l_{1..8}$, wobei beim Zeitindex 5 ein Phasensprung der Größe ΔN auftritt:

Zeitindex	1	2	3	4	5	6	7	8
Größe	l_1	l_2	l_3	l_4	$l_5 + \Delta N$	$l_6 + \Delta N$	$l_7 + \Delta N$	$l_8 + \Delta N$

Die Bildung von Differenzen in 4 Stufen entspricht einer mehrfachen Hochpassfilterung, bei der vorhandene langperiodische Trends - zum Beispiel die Änderungen der Satellitenposition - herausgefiltert, kurzfristige und plötzliche Änderungen - zum Beispiel aufgetretene Phasensprünge - hingegen erheblich verstärkt werden, was freilich auch für das Rauschen gilt.

Die Differenzen erster Ordnung ergeben sich zu l_2-l_1 , l_3-l_2 , l_4-l_3 , $l_5-l_4+\Delta N$, l_6-l_5 , l_7-l_6 und l_8-l_7 . Die Differenzen vierter Ordnung ergeben sich nach dem gleichen Schema schließlich zu:

Zeitindex	Differenzgröße	Wert der Differenzgröße (Differenz 4. Ordnung)
3	L_3	$l_5 - 4 \cdot l_4 + 6 \cdot l_3 - 4 \cdot l_2 + l_1 + \Delta N \approx \Delta N$
4	L_4	$l_6 - 4 \cdot l_5 + 6 \cdot l_4 - 4 \cdot l_3 + l_2 - 3 \cdot \Delta N \approx -3 \cdot \Delta N$
5	L_5	$l_7 - 4 \cdot l_6 + 6 \cdot l_5 - 4 \cdot l_4 + l_3 + 3 \cdot \Delta N \approx 3 \cdot \Delta N$
6	L_6	$l_8 - 4 \cdot l_7 + 6 \cdot l_6 - 4 \cdot l_5 + l_4 - \Delta N \approx -\Delta N$

Wenn also zwischen Zeitindex 4 und 5 ein deutlicher Sprung auffällt, besteht der Verdacht eines Phasensprungs an Stelle 4. Die Bestimmung der Unbekannten ΔN geschieht unter der Annahme einer *wirksamen* Hochpassfilterung, die sämtliche Periodizitäten hoher Periodendauer eliminiert hat, in guter Näherung durch die Beziehung

$$\Delta N = \frac{L_3 - L_4 + L_5 - L_6}{8} \quad (3.30)$$

Dieses Maß muss nun statistisch getestet werden. Zunächst sei dazu ein Blick auf die Genauigkeiten und die Korrelationen der Differenzgrößen $L_{3..6}$ gestattet: Die aus den obigen Gleichungen resultierenden Differenzgrößen sind aus den ursprünglichen Beobachtungen $l_{1..8}$ abgeleitete Größen, die miteinander auf Grund des funktionalen Zusammenhangs algebraisch korreliert sein werden. Eine Quantifizierung dieser Korrelationen ist unter Anwendung des Gesetzes der Fehlerfortpflanzung möglich, wobei sich die Kovarianzmatrix $\underline{\Sigma}_{LL}$ der Differenzgrößen L aus der Kovarianzmatrix $\underline{\Sigma}_{ll}$ der Ausgangsgrößen l berechnen lässt. Die Funktionalmatrix \underline{F} enthält in gewohnter Weise die partiellen Ableitungen der Differenzen- nach den Originalgrößen, d. h. für diesen konkreten Fall ergibt sich

$$\underline{F} = \begin{bmatrix} 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Bezüglich der Kovarianzmatrix $\underline{\Sigma}_{ll}$ der Ausgangsgrößen (Testgrößen) seien unkorrelierte Beobachtungen mit gleicher Varianz der Größe σ_l^2 unterstellt. Es ergibt sich als Ergebnis die Kovarianzmatrix zu

$$\underline{\Sigma}_{LL} = \sigma_l^2 \cdot \begin{bmatrix} +70 & -56 & +28 & -8 \\ & +70 & -56 & +28 \\ & & +70 & -56 \\ & & & +70 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Die auf der Diagonale befindlichen Varianzen der Differenzgrößen $L_{3..6}$ verdeutlichen den Genauigkeitsverlust: Das Rauschniveau hat um den Faktor $\sqrt{70} \approx 8,4$ zugenommen. Für die Genauigkeit $\sigma_{\Delta N}$ des potenziellen Phasensprungs wird wiederum die Fehlerfortpflanzung angewendet, wobei die \underline{F} -Matrix diesmal die einfache Form

$$\underline{F} = [0,125 \quad -0,125 \quad 0,125 \quad -0,125] \quad (3.33)$$

aufweist. Dann ergibt sich die Varianz

$$\sigma_{\Delta N}^2 = \underline{F} \cdot \underline{\Sigma}_{LL} \cdot \underline{F}^T = 11,625 \cdot \sigma_l^2 \quad (3.34)$$

und die Standardabweichung

$$\sigma_{\Delta N} = 3,41 \cdot \sigma_l \quad (3.35)$$

Im statischen Fall wäre dieses Verfahren grundsätzlich auch geeignet, um eine Fixierung des Wertes ΔN auf einen Ganzzahlwert zu vollziehen und so den Phasensprung zu schließen. Im kinematischen Fall kann dieses Verfahren nur sehr eingeschränkt verwendet werden, nämlich nur bei geringer Dynamik, da andernfalls keine wirksame Hochpassfilterung mehr möglich ist, d.h. der Testwert für ΔN von der Bewegung des Trägers trotz vierfacher Filterung zu stark beeinflusst ist.

3.4.1.3 Vergleich von Doppler- und Phasenmessungen

Die Benutzung von Doppler-Messungen, die als zusätzliche Beobachtungen zu den Phasenmessungen ermittelt werden, eröffnet für kinematische Anwendungen eine Methode der instantanen Aufdeckung von Phasensprüngen. Unter Verwendung der Dopplerwerte D zu den Epochen k und $k+1$ ergibt sich die Forderung

$$\int_{t_k}^{t_{k+1}} D(t) \cdot dt \approx \frac{1}{2} \cdot (D_k + D_{k+1}) \cdot (t_{k+1} - t_k) \stackrel{!}{=} (\phi_{k+1} - \phi_k) \quad (3.36)$$

mit t_k als Zeit zur Epoche k und ϕ als Phasenmessung. Im Falle eines Phasensprunges stimmen die linke und rechte Seite der Gleichung nicht mehr überein. Im Gegensatz zum vorhergehend beschriebenen Verfahren werden lediglich Daten aus der gegenwärtigen und der zurückliegenden Epoche benötigt. Aus der vereinfachten, numerischen - und damit eben nur näherungsweise - Auswertung des Integralausdruckes in Form einer Trapezfläche ergeben sich aber bei hohen Aufzeichnungsintervallen (geringe Frequenzen) Approximationsfehler, die eine wirksame Anwendung dieses Verfahrens nicht mehr erlauben. Für kinematische Daten mit ihren hohen Taktraten kann diese Methode jedoch grundsätzlich zur Anwendung kommen.

3.4.1.4 Geometriefreie Kombination von L_1 - L_2 -Trägerphasen

Bei Verwendung von Zweifrequenzmessungen kann auf einfache Weise eine Kombination gefunden werden

$$\lambda_{L_1} \cdot \phi_{L_1,k} - \lambda_{L_2} \cdot \phi_{L_2,k} \stackrel{!}{=} \lambda_{L_1} \cdot \phi_{L_1,k+1} - \lambda_{L_2} \cdot \phi_{L_2,k+1} \quad , \quad (3.37)$$

die frei von den geometrischen Änderungen ist und im Wesentlichen noch von den Änderungen der ionosphärischen Laufzeitverzögerung betroffen ist¹⁴. Liegen die beiden Epochen k und $k+1$ zeitlich nahe beieinander, so darf der Ionosphärenfehler als identisch betrachtet werden. Treten dann Unterschiede beim Vergleich zweier aufeinander folgender Testwerte auf, so kann ein Phasensprung als Ursache unterstellt werden. Dieses Verfahren kann sehr einfach implementiert werden, weist jedoch noch ein Restrisiko auf: Wenn auf L_1 und L_2 gleichzeitig Phasensprünge unterschiedlicher Größe auftreten, so besteht bei bestimmten Wertekombinationen die Möglichkeit, dass die Differenzbildung zur Elimination der Sprungbeträge führt und der Algorithmus den Phasensprung nicht detektieren kann. In der Praxis wird deshalb je nach Anwendung eine entsprechende Kombination bzw. Auswahl der einzelnen hier beschriebenen Verfahren angewendet.

3.4.2 Mehrweg («Multipath») und Signalbeugung

Bei den von GPS-Satelliten ausgestrahlten Signalen handelt es sich um Mikrowellen, die von Objekten reflektiert werden können. Überlagern sich direktes und indirektes (also reflektiertes) Signal, so kommt es zu unerwünschten *Mehrwege-Fehlern*, die gemäß BRAASCH [1996] auf Grund ihrer Entstehung im Umfeld der Empfänger-Antenne im Wesentlichen ein lokales Problem darstellen. Die unmittelbar am GPS-Satelliten möglichen Reflexionen können dabei nach GEORGIADOU u.a. [1988] über kurze Basislinien auf Grund positiver Korrelationen eliminiert werden. Mit Hilfe der stark vereinfachten Formel

$$\delta S_{MP} = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \arctan \left(\frac{\mu \cdot \sin \vartheta}{1 + \mu \cdot \cos \vartheta} \right) \quad (3.38)$$

¹⁴ Diese Kombination entspricht faktisch $L_{60,77}$ aus Tabelle 2.2

kann nach DACH [2000] der Mehrwegfehler δS_{MP} auf der Trägerphase abgeschätzt werden. Er wird durch den Reflexionskoeffizienten¹⁵ μ sowie durch die aufgetretene Phasenverschiebung ϑ definiert und könnte im Extremfall einen Wert von $\lambda/4$ annehmen.

Durch *Signalbeugung* können insbesondere bei kurzzeitigen statischen Messungen größere Fehler auftreten, dann kommt es in diesem Fall nicht zu einer Überlagerung von direktem und gebeugtem Signal, sondern das direkte Signal wird verdeckt, das gebeugte hingegen wird ohne Einfluss des direkten Signals noch verfolgt. BIBERGER u.a. [2001] erwähnen im Rahmen von Pseudolite-Anwendungen das »Signalkriechen« auf leitenden Oberflächen als einen ähnlichen Fehlereinfluss. Als Ursachen im Rahmen gewöhnlicher statischer GPS-Anwendungen machen WANNINGER u.a. [2000] bspw. Bäume und Gebäudeteile aus und nennen Größenordnungen von mehreren Zentimetern bis in den Dezimeterbereich hinein, erwähnen aber auch den deutlich geringeren Einfluss bei kinematischen Messungen auf Grund der sich relativ rasch ändernden Umgebung der Antenne.

3.4.2.1 Ausnutzung der zeitlichen Korrelation

Auf Grund der sehr hohen Ähnlichkeit der einen Sterntag nach Messung erneut auftretenden GPS-Satellitenkonstellation können Mehrwege-Effekte in solchen Koordinaten- bzw. Beobachtungsdifferenzen signifikant reduziert werden, siehe z.B. SEEGER [1989, 1993] oder RADOVANOVIC [2000]. Diese Aussage gilt ebenfalls für die Reduktion von Signalbeugungs-Erscheinungen. Diese Methode kann aber nur wirksam in einer weitgehend unveränderlichen Antennen-Umgebung eingesetzt werden, was bei der kinematischen Positionierung in vielen Fällen nicht gegeben ist.

3.4.2.2 Antennendesign

Die reflektierten Signale treffen häufig unter niedrigen Elevationswinkeln auf die Antenne, so dass der Einsatz von Choke-Ring-Antennen zur Verminderung des Einflusses sinnvoll ist. Bei diesem Typ werden Metallringe um die eigentliche Antenne derart angeordnet, dass eine Dämpfung der Signale unter niedrigen Höhenwinkeln eintritt. Nachteil dieses einfachen Prinzips sind ein erhöhter Durchmesser und erhöhtes Gewicht der Antenne. KUNYSZ [2001] beschreibt ein »adaptives« 7-Elemente Antennen-Array, dessen Eigenschaften nicht nur in geringen Abmessungen, sondern gleichfalls in reduzierter Mehrwege-Anfälligkeit bestehen soll. Im ENVISAT-Projekt (Kapitel 6) wurden derartige »Pinwheel«-Antennen der Firma NovAtel auf Bojen genutzt.

3.4.2.3 Signalverarbeitung im Empfänger

Eine spürbare Reduktion der Mehrwege-Effekte ist auch mit Hilfe verbesserter Signalverarbeitungs-algorithmen möglich, wie sie beispielsweise ZHDANOV u.a. [1999, 2002], GRAIN u.a. [1996] sowie GARIN u.a. [1997] oder MCGRAW [2000] beschreiben. Ohne an dieser Stelle auf weitere Details einzugehen, sei auch auf IRSIGLER [2000] verwiesen, der verschiedene Techniken analysiert und durch praktische Tests vergleicht - im Wesentlichen den bei Ashtech-Empfängern verwendeten *Strobe Correlator*, den *Narrow Correlator* von NovAtel sowie die *Everest Technologie* von Trimble. Er stellt dabei eine erhebliche Genauigkeitssteigerung von 83% im Falle der Strobe und Narrow Korrelatoren sowie 93% im Falle des Trimble-Empfängers fest. Der im einleitenden Abschnitt 3.4.2 erwähnte Maximalfehler von $\lambda/4$, also etwa 5 cm auf L_1 , dürfte nach diesen Erkenntnissen eher ein theoretischer Wert sein, der in der Praxis von modernen Empfängern grundsätzlich unterboten werden kann.

3.4.2.4 Modellierung

Der Versuch der Modellierung von Mehrwege-Effekten hat bisher zu keinen praktisch verwertbaren Ergebnissen geführt. Zwar versucht OEHLER [2001] diese Fehler zu simulieren, doch können die Ergebnisse auf Grund der vorgenommenen Approximationen nur zur Abschätzung der Größenordnung und des Verhaltens dieser Effekte herangezogen werden. Abbildung 3.2 zeigt die ermittelten Phasenfehler durch Mehrweg für ein Simulationsszenario in der Umgebung eines Fjordes. Die Maxi-

¹⁵ Dieser Dämpfungsfaktor ergibt sich in Abhängigkeit vom Material und Einfallswinkel des Satelliten und liegt per Definition zwischen 0,0 und 1,0.

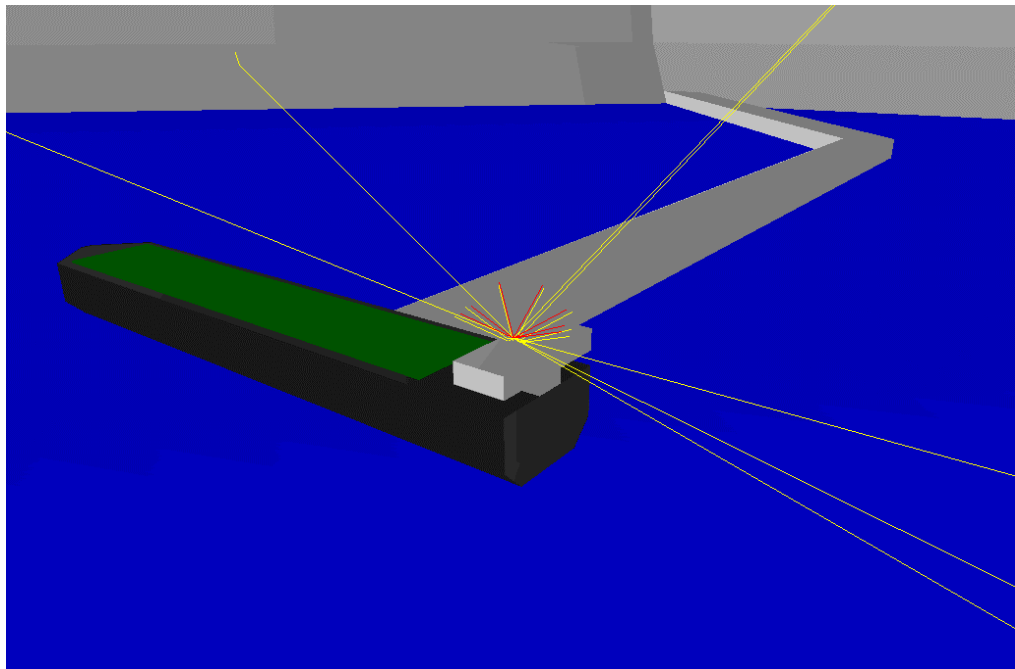


Abbildung 3.1: Simulationsszenario mit dem EPSS-Simulator des Instituts für Erdmessung und Navigation; siehe Oehler [2001] für weitergehende Informationen. Direkte und reflektierte GPS-Signale bzgl. der Empfangsantenne auf einem Tanker in einer Fjordumgebung werden dargestellt.

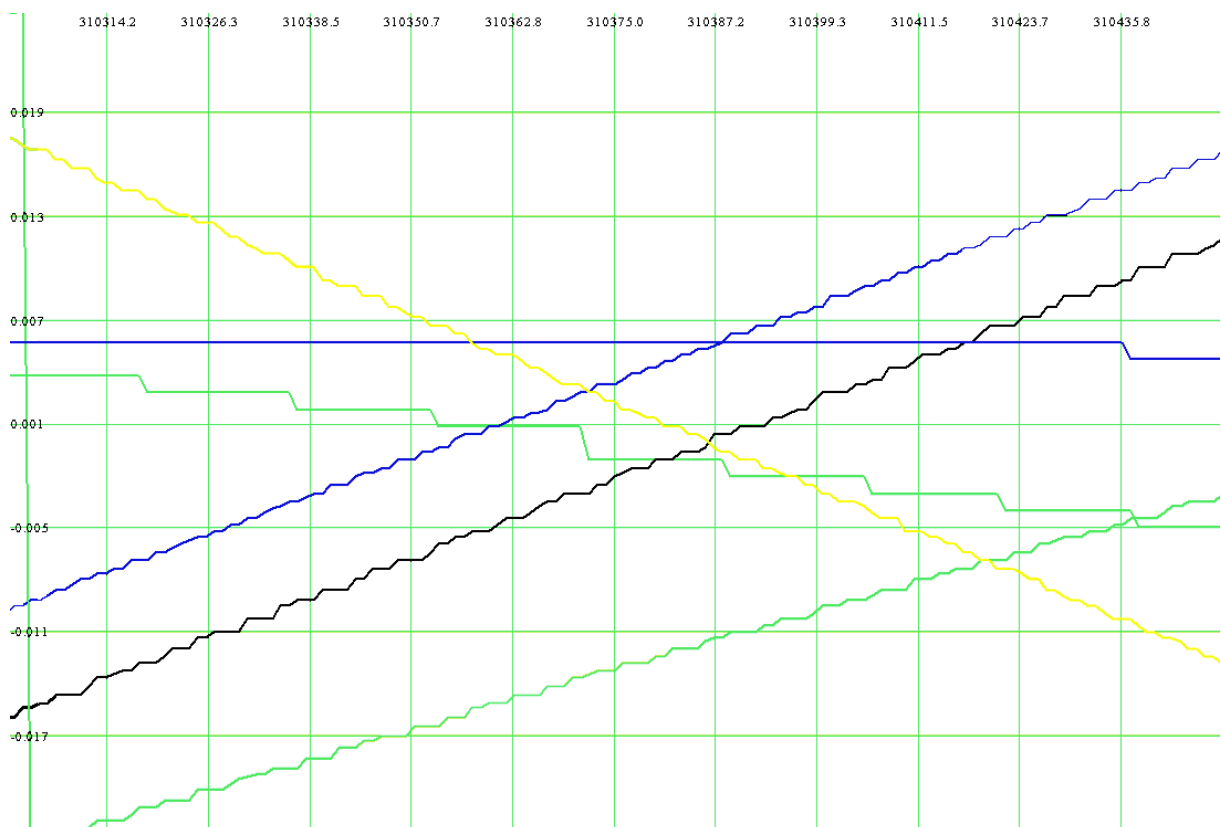


Abbildung 3.2: Über Raytracing ermittelter Mehrwege-Fehler auf den Trägerphasen für die einzelnen beteiligten Satelliten des Simulationsszenarios aus der vorhergehenden Abbildung. (y-Achse: Mehrwegfehler in Metern, x-Achse: GPS-Zeit in Sekunden)

malwerte liegen ungefähr bei 2 cm und spiegeln somit die bereits bekannte Größenordnung wider. Auf Grund der hohen Genauigkeitsanforderungen an das digitale Geländemodell sowie der nur unzureichend bzw. mit wirtschaftlichem Aufwand nicht erfassbaren Reflexionskoeffizienten der

Objekte und auch auf Grund der Vereinfachungen in der Modellierung - bspw. werden Reflexionen im vorliegenden Fall nur bis zur »Tiefe 4« simuliert - ist ein Einsatz zur exakten Korrektur realer Messungen nicht denkbar.

3.4.2.5 Detektion

Auch wenn eine Modellierung des Mehrwege-Fehlers keine ausreichende Genauigkeit aufweist, so wurde doch bisher deutlich, dass die internen Signalverarbeitungsalgorithmen zu einer Verbesserung führen. Trotzdem werden Restfehler bleiben. Eine Erkennung der mit Multipath behafteten Messungen ist deshalb nicht unwichtig. Die bisher bereits mehrfach genutzte Kombination von Strecken- und Trägerphasenmessungen lässt sich auch zu diesem Zweck benutzen

$$MP_{L1,k}^i = S_{L1,k}^i - \phi_{L1,k}^i = 2 \cdot \delta S_{ION,L1,k}^i + N_{L1}^i \cdot \lambda_{L1} \quad , \quad (3.39)$$

denn dieser Fehler ist auf der Trägerphase erheblich geringer als auf den Kode-Strecken, so dass jene im Vergleich zu den als quasi-wahr betrachteten Phasen mögliche Multipath-Einflüsse anzeigen, wenn man die Funktion zur Epoche k über eine gewisse Zeit bis zur Epoche $k+n$ beobachtet und systematische Schwankungen analysiert¹⁶. Da sich in dieser Zeitreihe die Änderungen in der ionosphärischen Laufzeitverzögerung mit dem Mehrweg-Signal überlagern, ist die Verwendung einer ionosphärenfreien Linearkombination sinnvoll. Alternativ müssen die Beobachtungsintervalle entsprechend reduziert werden.

Abbildung 3.3 zeigt das Ergebnis einer solchen Mehrweg-Analyse vom 06.10.2003 für die Referenzstation IF1A des Instituts für Erdmessung und Navigation. Hierzu wurden Daten eines Ashtech Z-Base Empfängers mit einer zeitlichen Abtastung von 1 Hz verwendet. Die RMS-Werte der einzelnen Satellitenspuren wurden auf ein $1^\circ \times 1^\circ$ Gitter aufgelöst und anschließend (horizontal) interpoliert.

Es sei angemerkt, dass die Farbskala Werte ab 5,7 m in roter Farbe darstellt, wobei eine maximale Standardabweichung von 9,5 m erreicht wird. Die grünen Farbtöne zwischen 1,7 und 3,7 m repräsentieren Bereich mit weniger kritischem Mehrweg-Einfluss. Insgesamt kann die Multipath-Situation bei Elevationen über 15° als eher unproblematisch identifiziert werden. Lediglich im Azimutfenster zwischen 210° und 290° kommt es zu erhöhten Werten, die scheinbar mit einer in Nähe des Messkontainers vorhandenen hohen Baumgruppe in Zusammenhang stehen. Weiterhin kommt es im Bereich von 15° bis 90° zu erhöhtem Mehrweg, allerdings konzentriert er sich auf Höhenwinkel unterhalb von 10° .

Anhand dieses Bildes ist die Ableitung einer Multipath-Maske möglich, die für Referenzstationen verwendet werden kann. Die Methode ist weiterhin zur Analyse kinematischer Daten prinzipiell geeignet. Allerdings kann im Gegensatz zum statischen Fall häufig nicht auf jene gänzlich verzichtet werden, da zur effizienten Mehrdeutigkeitssuche möglichst viele Satelliten verwendet werden sollten. Aus diesem Grunde wird hier eine stochastische Modellierung angewandt, bei der durch Mehrweg korruptierte Messungen eine höhere Standardabweichung erhalten¹⁷. Dadurch gehen die Satellitendaten im Auswerteprozess nicht verloren, aber die Konvergenzzeit bis zur erfolgreichen Lösung der Mehrdeutigkeiten verlängert sich entsprechend.

Ein Blick auf das zeitliche Verhalten des Multipath-Signals in Abbildung 3.4 verdeutlicht den starken Anstieg der Fluktuationen bei niedrigen Elevationen. Diese sind neben dem grundsätzlich schlechteren Signal-Rausch-Verhältnis, das sich in einem zufälligen Rauschen äußert, maßgeblich durch Kurzzeitsystematiken bedingt, die sich mit Mehrweg-Effekten in Verbindung bringen lassen. Diese weisen im Fall der Referenzstation IF1A Perioden von zirka einer Minute auf. Das in Abbildung 3.6 dargestellte Ergebnis einer Fourier-Analyse zeigt maximale Amplituden bei den niedrigeren Frequenzen. Die größten Periodendauern werden dabei durch die hohen Amplituden beim Auf- und

¹⁶ Voraussetzung zur Anwendung dieser Methode sind Streckenmessungen, die *nicht* zuvor mit Hilfe der Trägerphasen geglättet wurden, was nicht bei allen modernen Empfängern in voller Freiheit programmierbar ist.

¹⁷ Werte im Bereich von 2 bis 3 cm haben sich in der Praxis bewährt.

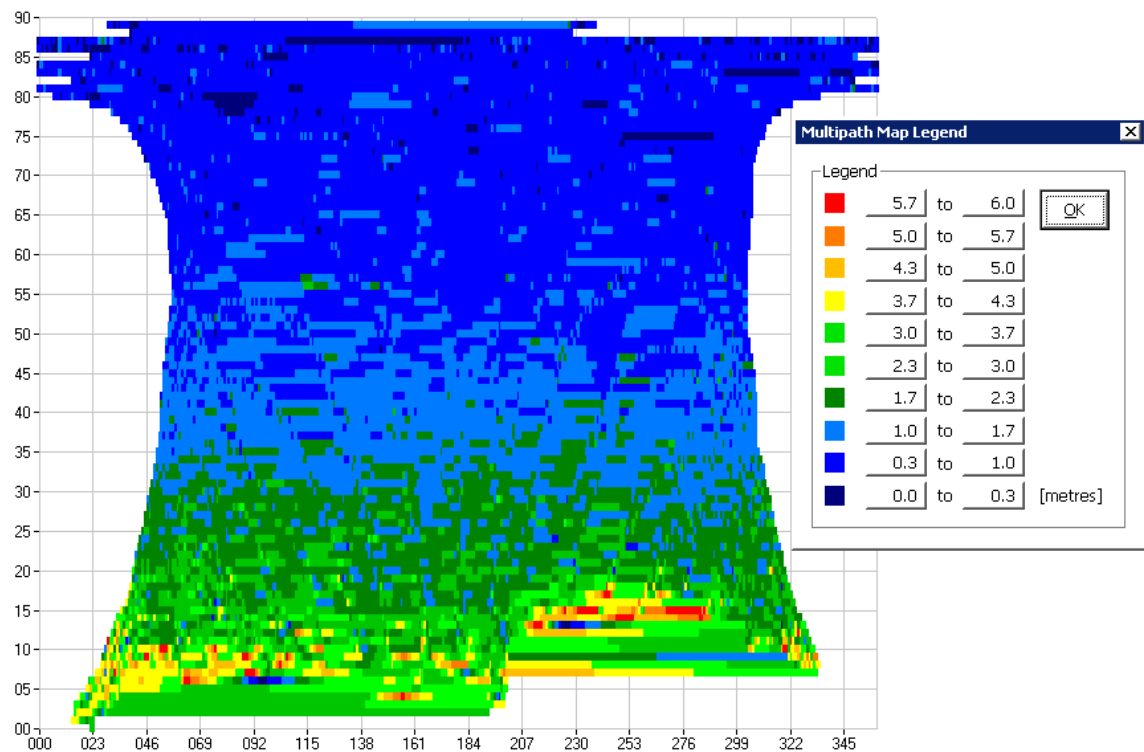


Abbildung 3.3: Ergebnis der Mehrweg-Analyse für die Referenzstation IF1A in Abhängigkeit vom Azimut (x-Achse) und dem Höhenwinkel (y-Achse).

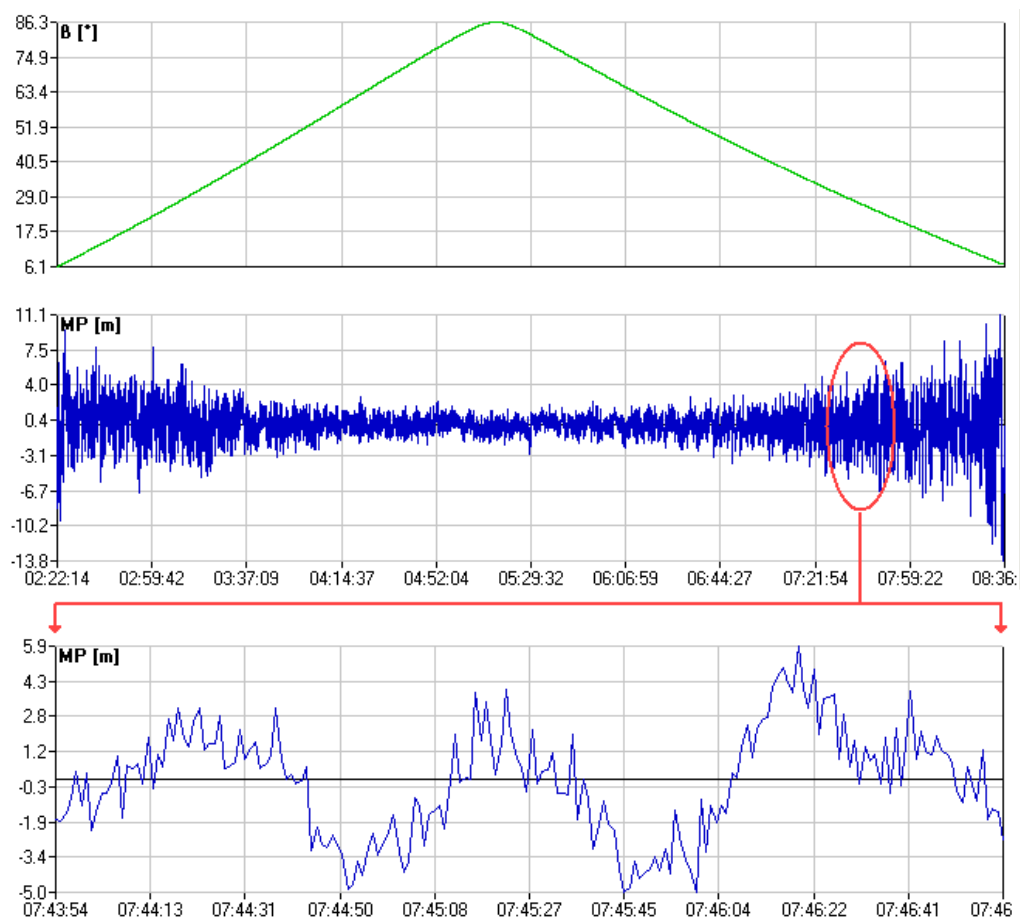


Abbildung 3.4: Elevation β des Satelliten PRN1 sowie Multipath-Signal MP zwischen 02:22 und 08:36 Uhr GPS-Zeit sowie in der Vergrößerung zwischen 07:44 und 07:47 Uhr.

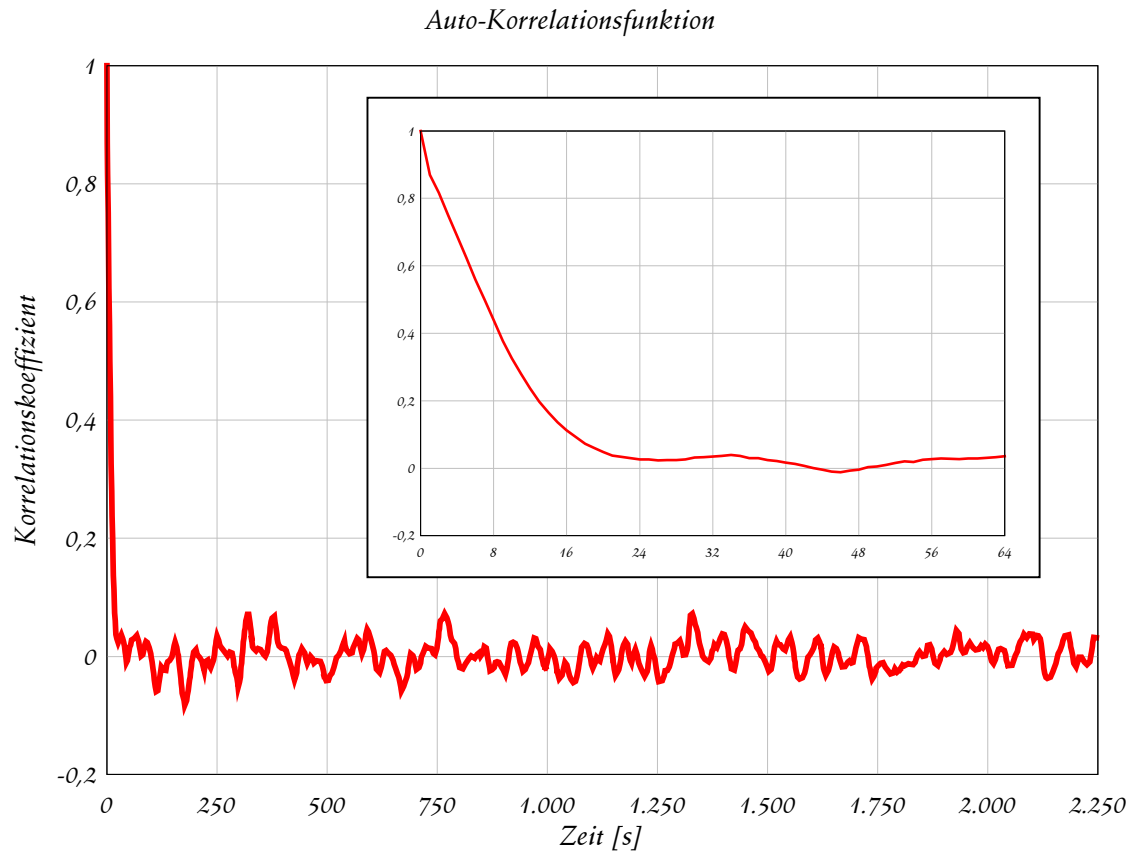


Abbildung 3.5: Auto-Korrelationsfunktion für die Zeitreihe des Satelliten PRN1.

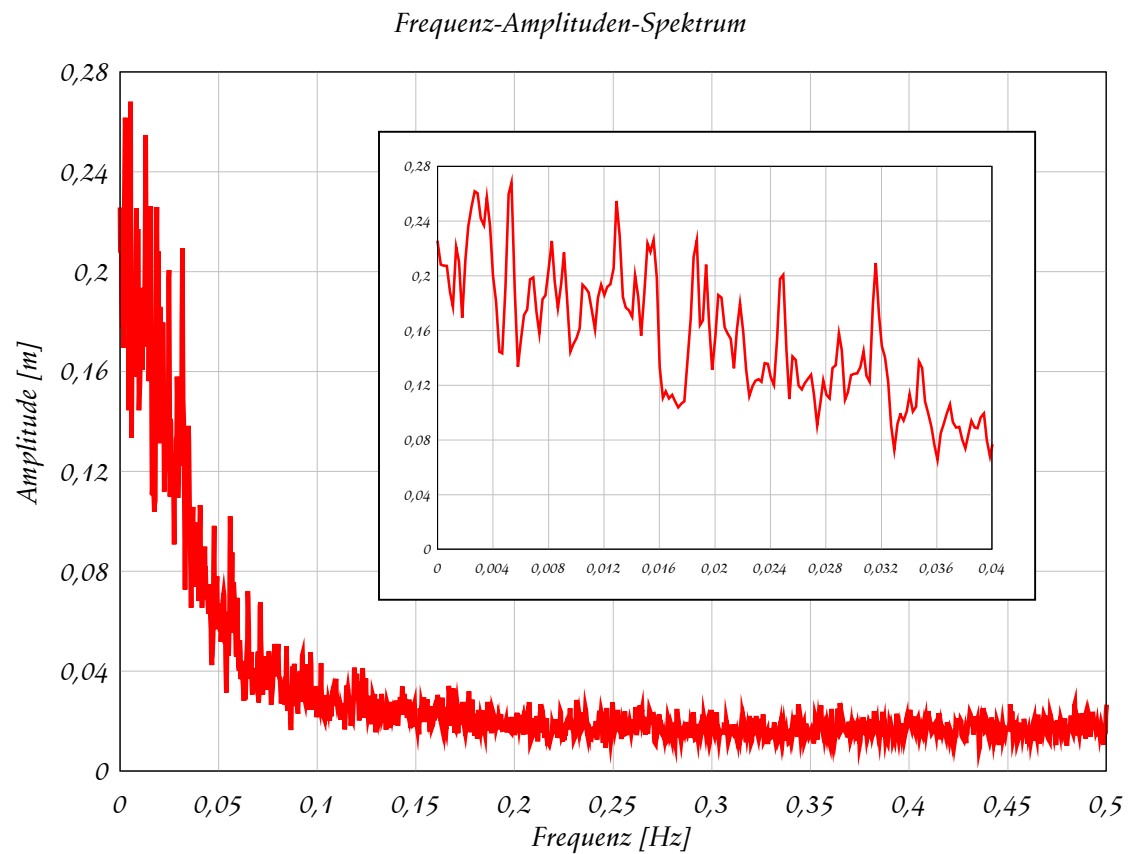


Abbildung 3.6: Frequenz-Amplituden-Diagramm für die Zeitreihe des Satelliten PRN1.

Abstieg des Satelliten induziert, was aber nicht die zeitlichen Variationen der Mehrwege-Fehler charakterisiert. Diese sind jedoch als Maxima im Frequenzfenster bis ca. 0,035 Hz gut sichtbar. Spitzen finden sich bei 360, 188, 77, 54, 40 sowie 32 s, es ergeben sich also Periodizitäten zwischen 0,5 und 6 Minuten. Die in Abbildung 3.5 dargestellte Auto-Korrelationsfunktion der Zeitreihe stützt die Aussage, dass die systematischen Signaturen durch Multipath im Zeitfenster kleiner als eine Minute überwiegen, denn die Auto-Korrelation sinkt bereits bei Zeitabständen von weniger als 48 s auf den Nullwert ab. Nur knapp 4% der Messwerte sind voneinander stochastisch unabhängig.

Modernere Ansätze zur Detektion des Mehrwegs, die in zukünftigen Empfängern eingesetzt werden können, können ihre Wirksamkeit bereits demonstrieren. Beispielsweise wird versucht, den Mehrwegefehler im Empfänger mitzuschätzen (*»Multipath Estimating Delay Lock Loop«*), was mit Einschränkungen funktioniert¹⁸. In diesem Zusammenhang sind weitere Innovationen durch den verstärkten Einsatz vieler Parallelkorrelatoren zu erwarten, die in gegenwärtigen Empfängern aber standardmäßig noch nicht verfügbar sind.

3.4.2.6 Stochastische Modellierung

Mehrwege-Effekte bewirken nach WANNINGER u. a. [2000] Fluktuationen des Signal-Rausch-Verhältnisses, während Signalbeugungen zu einer Verringerung desselben führen. Neben der systematischen Abgewichtung von Beobachtungen, die in erkannten Mehrweg-Zeitfenstern liegen, kann also das Signal-Rausch-Verhältnis zur stochastischen Modellierung herangezogen werden. REICHERT und AXELRAD [2001] verwenden einen solchen Ansatz z.B. mit mäßigem Erfolg zur Verbesserung von Neigungsbestimmungen auf einem Satelliten (Mehr-Antennensystem).

SLEEWAEGEN [1997] ermittelt den Multipath-Effekt aus der bereits diskutierten Kombination von Strecken- und Phasenmessungen und errechnet aus den korrespondierenden Werten des Vortages die Differenzen. Zwischen diesen Differenzen und den Änderungen des Signal-Rausch-Verhältnisses (SNR) wird nun ein Umrechnungskoeffizient ermittelt, der zur Berechnung der Mehrweg-Fehler aus den Signal-Rausch-Verhältnissen des Beobachtungstages benutzt werden kann. Der Algorithmus führt keine stochastische Modellierung durch, sondern versucht, eine funktionale Beziehung zwischen dem SNR und dem Mehrweg-Fehler herzustellen und kann grundsätzlich als eher für statische Szenarien geeignet bezeichnet werden.

LAU und MOK [1999] stellen die Kovarianzmatrix für die doppelten Differenzen unmittelbar mit Hilfe der SNR-Werte auf und berücksichtigen dabei die auftretenden algebraischen Korrelationen. WANNINGER u. a. [2000] erwähnen zunächst die Einführung von Gewichten

$$p_A^i = \sin^2 \varepsilon \quad (3.40)$$

in reiner Abhängigkeit von der Elevation ε des Satelliten. Auf diese Weise wird im Wesentlichen der Dämpfung der Signale unter niedrigen Höhenwinkeln auf Grund des Antennendiagramms und dem damit einhergehenden höheren Rauschniveau der Messungen Rechnung getragen. Da Mehrwege-Effekte vorzugsweise bei geringeren Elevationen auftreten, kann ein solch einfacher Ansatz auch in beschränktem Maß zu einer Reduktion dieses Fehlereinflusses beitragen. Für Werte im Zenit erhalten wir das maximale Gewicht von 1, so dass dieser normierte Ansatz zur Kombination mit weiteren Teilmatrizen des stochastischen Modells bzw. der Gewichtsmatrix prinzipiell geeignet ist. Weiterhin wird aber auch ein Exponentialansatz

$$p_A^i = \exp(q \cdot B) \quad \wedge \quad q < 1 \quad (3.41)$$

unter Nutzung des Signal-Rausch-Verhältnisses B vorgeschlagen, der durch Abstimmung des Faktors q auf den Empfänger und die Trägerfrequenz ebenfalls normierte Gewichte liefert, also für das maximale SNR (und somit grundsätzlich für maximale Elevationen) ebenfalls gegen 1,0 konvergiert.

¹⁸ siehe z. B. VAN NEE u.a. [1994] oder TOWNSEND u.a. [1995]

Sofern Messungen des SNR vorliegen¹⁹, kann dieser Gewichtsansatz auf vergleichsweise einfache Weise in die stochastische Modellierung aufgenommen werden. Andernfalls sollte in jedem Fall eine Gewichtung in Abhängigkeit von der Elevation erfolgen.

3.4.3 Relativistische Effekte

Die Relativitätstheorie befasst sich mit der Struktur von Raum und Zeit sowie mit der Schwerkraft bzw. Gravitation²⁰. Sie besteht aus der *speziellen Relativitätstheorie* und der *allgemeinen Relativitätstheorie*. Erstere wurde von A. EINSTEIN im Jahre 1905 veröffentlicht, letztere erst 1916 abgeschlossen. Die spezielle Relativitätstheorie beschreibt das Verhalten von Raum und Zeit aus der Sicht von Beobachtern, die sich relativ zueinander bewegen. Darauf aufbauend führt die allgemeine Relativitätstheorie die Gravitation auf eine Krümmung von Raum und Zeit zurück, die unter anderem durch die beteiligten Massen verursacht wird.

Die durch diese Theorien beschriebenen Phänomene entziehen sich im Alltag oft einer anschaulichen Vorstellung, lassen sich jedoch mathematisch/physikalisch präzise beschreiben und sind experimentell bereits - z.B. durch Elementarteilchen-Versuche - bestätigt worden. Es liegt nahe, dass die Relativitätstheorie(n) auch für die Satellitennavigation relevant sein müssen. Tatsächlich liegen relativistische Effekte für die meisten Anwendungen der Satellitengeodäsie innerhalb der Beobachtungsgenauigkeit, worauf SEEBER [1989, S. 108] hinweist. Er führt aber weiter aus: „In vielen Fällen heben sie sich durch das Messverfahren heraus oder sie werden durch andere Parameter aufgefangen.“ Diese Feststellung trifft auf die in dieser Arbeit durchgeführte präzise Positionierung mit GPS in besonderem Maße zu, da die Bildung doppelter Differenzen als Beobachtungsgrößen fast alle relativistischen Effekte wirksam eliminiert. Trotzdem soll aus Gründen der Vollständigkeit im nächsten Abschnitt auf die maßgeblichen Faktoren eingegangen werden. Anschließend wird der wichtigste Effekt beschrieben, der bei längeren Basislinien auch nach doppelter Differenzbildung in den Beobachtungen verbleibt.

3.4.3.1 Übersicht

Die bei der GPS-Positionierung wirkenden relativistischen Effekte werden von ASHBY und SPILKER [1996] beschrieben. Dabei wird unterschieden, ob der GPS-Empfänger sich erdfest an der Oberfläche bzw. am Geoid befindet oder ob er sich über ihm in Bewegung befindet.

Im ersten Fall muss zunächst der Unterschied im *Gravitationspotenzial* berücksichtigt werden, da sich Empfänger und Transmitter an unterschiedlichen Orten befinden und sich der Satellit außerdem mit einer bestimmten Geschwindigkeit relativ zur Erde bewegt. Die Summe dieser Effekte bewirkt - bei Annahme einer Kreisbahn - eine scheinbare Frequenzveränderung, die durch eine Verringerung der nominellen Satellitenoszillatorfrequenz um 0,00455 Hz berücksichtigt wird. Ein verbleibender Anteil auf Grund unterschiedlicher Bahnhöhen der einzelnen Satelliten wird durch den linearen Driftparameter der Satellitenuhren aufgefangen (über Broadcast-Message abgestrahlt). Auf Grund der leicht *elliptischen GPS-Bahnen* wird weiterhin ein periodischer Effekt induziert (Exzentrizität der Satellitenbahn), der bei der Verwendung undifferenzierter Messungen berücksichtigt werden muss, durch die doppelte Differenzbildung jedoch eliminiert wird. Weiterhin nennen die Autoren noch den *SAGNAC-Effekt*, der im strengen Sinne aber kein relativistischer Effekt ist, sondern durch die Drehbewegung der Erde während der Signallaufzeit auftritt und richtiger als *Erdrotationskorrektur* in der Literatur zu finden ist.

Auf bewegte Nutzer über dem Geoid wirken theoretisch zusätzlich weitere Effekte, die jedoch grundsätzlich nur beim Einsatz von GPS-Empfängern auf Satelliten explizite Berücksichtigung erfahren müssen. Schließlich können auch noch sekundäre Effekte genannt werden, die jedoch in

¹⁹ Im RINEX-Format wurden die Signal-Rausch-Verhältnisse für L_1 und L_2 ($S1$ und $S2$) inzwischen als nicht-obligatorische Datenfelder eingeführt, eine Aufzeichnung erfolgt jedoch nicht auf allen IGS-Stationen.

²⁰ Im deutschen Sprachgebrauch wird unter dem Begriff „Schwere“ die Gravitationswirkung abzüglich der wirkenden Zentrifugalbeschleunigung verstanden (z.B. bei Messungen auf der Erdoberfläche). Die Relativitätstheorie befasst sich im Wesentlichen mit der Gravitation an sich.

Praxis ebenfalls nicht relevant sind. Beispielsweise bewirken die *Gezeiten* Veränderungen im Gravitationspotenzial und die *Abplattung* der Erde führt zu Abweichungen vom sphärischen Gravitationsmodell.

3.4.3.2 Radar Delay Effect

Nach WÜBBENA [1991] verbleibt auch in doppelten Differenzen noch der sog. *Radar Delay Effect*

$$\delta S_{A,RDE}^i = \frac{2 \cdot GM}{c^3} \cdot \ln \left(\frac{|\underline{X}^i| + |\underline{X}_A| + |\underline{X}^i - \underline{X}_A|}{|\underline{X}^i| + |\underline{X}_A| - |\underline{X}^i - \underline{X}_A|} \right) \quad (3.42)$$

mit GM als geozentrischem Gravitations-Massenprodukt ($3,986005 \cdot 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$ im WGS84) und der Satellitenposition \underline{X}^i (erdfestes System) sowie den Stationskoordinaten \underline{X}_A und der Lichtgeschwindigkeit c . Diese Korrektur kann maximale Werte um 2 cm für undifferenzierte Messungen erreichen. Die funktionale Darstellung des Effektes ist hinreichend genau, eine stochastische Modellierung nicht notwendig. Für doppelte Differenzen wirkt sich dieser Effekt deutlich schwächer aus und kann bei Basislinienlängen von wenigen hundert Kilometern zumeist vernachlässigt werden.

3.4.4 Bewegungskorrektur

Da die Positionsbestimmung über GPS durch Anbindung an die Koordinaten der Satelliten erfolgt, die in einem globalen System bestimmt werden, spiegeln sich in den Zeitreihen der Stationskoordinaten auch geodynamische Bewegungsmuster - im Wesentlichen auf Grund der Plattentektonik - wider. Auch eine Referenzstation bewegt sich - global betrachtet - mit geringer Geschwindigkeit. Diese Bewegung wird in der Praxis linear in Form des Geschwindigkeitsvektors \underline{v}_X approximiert, der im Allgemeinen als zeitlich invariabel betrachtet wird. Die Koordinaten werden auf einen Referenzzeitpunkt t_{REF} bezogen und im einfachen Fall zum gewünschten Zeitpunkt t

$$\underline{X}(t) = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \underline{X}(t_{REF}) + (t - t_{REF}) \cdot \underline{v}_X(t_{REF}) \quad \wedge \quad \underline{v}_X(t_{REF}) \equiv \underline{v}_X(t) \quad (3.43)$$

linear prädiziert. Im nachfolgenden Kapitel wird eine Analyse der Zeitreihen von Referenzstationen vorgenommen und ein erweitertes Bewegungsmodell erarbeitet, das auch saisonale Variationen einschließt und die Auswirkung von Luftdruckänderungen berücksichtigt.

3.4.5 Gezeiten der festen Erde

Die von Mond und Sonne - und in geringerem Maße auch von weiteren Körpern des Sonnensystems - ausgehenden Anziehungskräfte bewirken eine Deformation der Erdkruste. Diese Gezeiten der festen Erde können Amplituden von einigen Dezimetern erreichen. Bereits die von LANDAU [1988] gegebene vereinfachte Formel

$$\Delta \underline{x}_{GZ;M} = \frac{m_M}{m_E} \cdot \frac{r_E^4}{|\underline{X}_M|^3} \cdot \left[3 \cdot l_2 \cdot \frac{\underline{X}_A \cdot \underline{X}_M}{|\underline{X}_A| \cdot |\underline{X}_M|} \cdot \frac{\underline{X}_M}{|\underline{X}_M|} + \left[3 \cdot \left(\frac{h_2}{2} - l_2 \right) \cdot \left(\frac{\underline{X}_A \cdot \underline{X}_M}{|\underline{X}_A| \cdot |\underline{X}_M|} \right)^2 - \frac{h_2}{2} \right] \cdot \frac{\underline{X}_A}{|\underline{X}_A|} \right] \quad (3.44)$$

kann erfolgreich zur relativen Positionierung herangezogen werden. Exemplarisch sei hier die Formel zur Berechnung des Korrekturvektors für die Anziehungskraft durch den Mond mit seiner Position \underline{X}_M und der Masse m_M gegeben. Die Masse der Erde sei m_E , ihr Radius r_E und die Koordinaten des GPS-Empfängers sind im Vektor \underline{X}_A enthalten. Die Love und Shida-Zahlen werden durch h_2 bzw. l_2 symbolisiert. Da sie lediglich die von der Frequenz unabhängigen Transferfunktionen bis zu Grad und Ordnung 2 berücksichtigt, verbleiben Restfehler von wenigen Zentimetern, die sich zumeist aber in systematischen Offsets äußern. Der hier verwendete, deutlich erweiterte Algorithmus folgt dem IERS

Referenzmodell²¹ und weist eine Genauigkeit im Millimeterbereich auf. Die funktionale Modellierung erfolgt also mit übergeordneter Genauigkeit, so dass eine stochastische Modellierung nicht notwendig ist.

3.4.6 Ozeanische Auflasten

Ozeanische Auflasten können nach DACH [2000] Deformationen im Bereich von bis zu einigen Zentimetern verursachen. Maximale Amplituden werden im Wesentlichen bei küstennahen Orten erreicht. Die Auflastmodelle konnten inzwischen teilweise deutlich verbessert werden. Der implementierte Algorithmus folgt MCCARTHY [1996] und drückt die Korrekturen wie folgt im lokalen geodätischen System aus:

$$\Delta \underline{x}_{OA} = \begin{pmatrix} -\Delta x_3 \\ -\Delta x_2 \\ \Delta x_1 \end{pmatrix} \wedge \Delta x_c = \sum_j f_j \cdot a_{c,j} \cdot \cos(\omega_j \cdot t + \chi_j + u_j - \phi_{c,j}) \wedge c = 1, 2, 3 \quad (3.45)$$

Dabei ist t das Zeitargument, $a_{c,j}$ die Amplitude der Partialtide j für die Koordinatenkomponente c , ϕ der Phasenwinkel, f und u Skalierungsfaktoren und Phasenkorrekturen für die Partialtiden, ω die Kreisfrequenz und χ das astronomische Argument für die Partialtide j . Die Auflastkoeffizienten in Form der Amplituden und Phasenverschiebungen können über den *Ocean Tide Loading Provider* der Chalmers Universität bezogen werden²².

3.4.7 Erdrotation, Polposition

Nach MCCARTHY [1996, 2003] kann der Unterschied zwischen dem mittleren und momentanen Pol zu Deformationen bis ca. 2,5 cm führen. Der Korrekturvektor für diese sog. Poldtide im lokalen geodätischen Koordinatensystem (Nord-, Ost- und Radialkomponente) lautet

$$\Delta \underline{x}_{PT} = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} +0.009 \left[\frac{m}{''} \right] \cdot \cos 2\theta \cdot (x_{POL} \cdot \cos \lambda - y_{POL} \cdot \sin \lambda) \\ +0.009 \left[\frac{m}{''} \right] \cdot \cos \theta \cdot (x_{POL} \cdot \sin \lambda + y_{POL} \cdot \cos \lambda) \\ -0.032 \left[\frac{m}{''} \right] \cdot \sin 2\theta \cdot (x_{POL} \cdot \cos \lambda - y_{POL} \cdot \sin \lambda) \end{pmatrix} \quad (3.46)$$

mit den Polkoordinaten x_{POL} und y_{POL} in Bogensekunden, der Poldistanz der Station θ und der Länge λ .

KOUBA und HÉROUX [2001] erwähnen ferner, dass die Erdrotationsparameter des IERS bzw. IGS nicht die täglichen bzw. sub-täglichen Schwankungen in der Erdrotation berücksichtigen, die maßgeblich auf ozeanische Gezeiten zurückgehen und an der Erdoberfläche Veränderungen bis zu 3 cm verursachen. Insbesondere für kürzere (statische) Messungen wird die funktionale Modellierung empfohlen. Der Korrekturvektor für diese täglichen Variationen erfolgt im globalen kartesischen System mit

$$\Delta \underline{x}_{TV} = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y \cdot \delta UT_t + Z \cdot \delta X_p \\ -X \cdot \delta UT_t - Z \cdot \delta Y_p \\ -X \cdot \delta X_p + Y \cdot \delta Y_p \end{pmatrix}, \quad (3.47)$$

den Stationskoordinaten X, Y, Z (ebenfalls global kartesisch) und den Rotationsparametern δY_p (um die x -Achse), δX_p (um die y -Achse) und $-\delta UT_t$. Diese Parameter werden ähnlich wie bei der praktischen Berechnung ozeanischer Auflast-Einflüsse

²¹ sie MCCARTHY [1996] sowie MCCARTHY, PETIT [2003]

²² siehe <http://www.oso.chalmers.se/~loading/> (6. Juli 2004)

$$\delta X_p = \sum_{j=1}^8 F_j \cdot \sin \xi_j + G_j \cdot \cos \xi_j \quad (3.48)$$

durch Summation der einzelnen Tideneinflüsse berechnet. Obige Formel stellt exemplarisch die Berechnung eines Rotationsparameters mit den Gezeitenwellen-Koeffizienten F_j und G_j für die $j = 1 \dots 8$ bedeutsamen Tiden $M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1$ und Q_1 dar. Das in dieser Arbeit berücksichtigte Berechnungsschema²³ folgt RAY u.a. [1994].

3.4.8 Satellitenbahn

Die Genauigkeit der GPS-Satellitenpositionen ist maßgebend für die erzielbare Genauigkeit der bestimmten Positionen der Empfangsantenne. Auf Grund der hohen funktionalen Korrelation der Orbitfehler werden präzise Positionierungen über kurze Basislinien nur gering von dieser Fehlerquelle tangiert, während sie über längere Distanzen an Bedeutung zunimmt. Die Genauigkeit der sog. *Broadcast-Ephemeriden*, die als Informationen auf die Trägerwellen des GPS-Signals aufmoduliert werden, kann mit etwa 0,5 bis 5 m abgeschätzt werden und stellt damit die ungenaueste Klasse der Orbitprodukte dar. Mit geringer Verspätung von wenigen Stunden kann der Nutzer nach KOUBA und HÉROUX [2001] auf die *Ultra-Rapid Orbits* des IGS zurückgreifen, deren Genauigkeit im Allgemeinen auf einige Dezimeter abgeschätzt werden kann. Bereits 17 Stunden nach dem Ende des Vortages wird die Kombination der *Rapid Orbits* beim IGS vorgenommen, die in ihrer Genauigkeit den - mit 11 Tagen Verspätung verfügbaren - endgültigen Orbitprodukten kaum nachstehen. Die Präzision dieser *finalen Satellitenbahnen* wird gegenwärtig mit etwa 3 bis 5 cm angegeben.

Auf Grund dieser inzwischen hochpräzisen Satellitenbahnen spielen Orbitfehler bei vielen Anwendungen nur noch eine untergeordnete Rolle. Da im Rahmen dieser Arbeit jedoch auch die Positionierung über lange Basislinien durchgeführt wird, ist eine Abschätzung des verbleibenden Fehlers im Beobachtungsraum der doppelten Differenzen notwendig. Leider sind die dazu nötigen stochastischen Informationen grundsätzlich unvollständig. Die Kopfzeilen der SP3-Orbitdateien enthalten immerhin eine Genauigkeitsabschätzung der Positionsungenauigkeit, machen jedoch keine Aussage über etwaig vorhandene Korrelationen²⁴. Die Kovarianzmatrix der Satellitenpositionen

$$\underline{\Sigma}_{XYZ,SAT} = \begin{bmatrix} \sigma_i^2 & & & \\ & \sigma_i^2 & & \\ & & \sigma_i^2 & \\ & & & \sigma_j^2 \\ & & & & \ddots \end{bmatrix} \wedge \sigma_{X,i} = \sigma_{Y,i} = \sigma_{Z,i} = \sigma_i \quad (3.49)$$

wird deshalb als Diagonalmatrix approximiert und mit der Funktionalmatrix

$$\underline{F} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB,LK}^{ij}}{\partial X_i} & \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB,LK}^{ij}}{\partial Y_i} & \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB,LK}^{ij}}{\partial Z_i} & \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB,LK}^{ij}}{\partial X_j} & \dots \\ \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB,LK}^{ik}}{\partial X_i} & \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB,LK}^{ik}}{\partial Y_i} & \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB,LK}^{ik}}{\partial Z_i} & & \frac{\partial \nabla \Delta \phi_{AB,LK}^{ik}}{\partial X_k} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & & & \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

in den Beobachtungsraum transformiert

²³ Quellcode für eine entsprechende Subroutine in FORTRAN wird vom IERS über anonymes FTP bereitgestellt: <ftp://maia.usno.navy.mil/conventions/chapter8/ray.f> (6. August 2004)

²⁴ Im November 2004 wurde vom IGS das modifizierte SP3c-Format angekündigt, siehe IGS-Mail 5000, das nunmehr die Bereitstellung individueller Standardabweichungen für die drei Koordinatenkomponenten vorsieht. Die Angabe von Korrelationen erfolgt jedoch weiterhin nicht. Formatbeschreibung über anonymes FTP erhältlich unter <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/sp3c.txt> (Januar 2005).

$$\underline{\Sigma}_{\nabla\Delta\phi,SAT} = \underline{F} \cdot \underline{\Sigma}_{XYZ,SAT} \cdot \underline{F}^T \quad (3.51)$$

Bei Durchflug des Satelliten durch den Erdschatten²⁵ (*»Eclipsing Season«*) kann die Standardabweichung der Koordinatenkomponenten im Falle der noch verbleibenden Block IIA-Satelliten systematisch erhöht und dieses Problem somit ebenfalls auf einfache Weise stochastisch modelliert werden. Diese stochastische Modellierung beschreibt auf Grund der wenigen verfügbaren Eingangsdaten die Realität sicherlich nur in eingeschränktem Maße vollständig, erfüllt aber ihren wesentlichen Zweck, indem sie auf Grund der funktionalen Zusammenhänge Messungen über in der Nähe gelegene Referenzstationen mit geringen Standardabweichungen versieht (also mit hohen Gewichten), bei Verwendung weit entfernter Basisstationen aber eine Abgewichtung vornehmen wird.

Es sei weiterhin angemerkt, dass die Satellitenorbits neben der atmosphärischen Refraktion diejenigen Fehlergrößen sind, für die im Rahmen dieser Untersuchungen zur Verbesserung der Robustheit der Mehrdeutigkeitsfixierung eine systematische Fehlerfortpflanzung betrieben wird, so dass neben dem stochastischen Modell auch im Beobachtungsraum der Vektor

$$\underline{L}_{\Delta,SAT} = \underline{F} \cdot \underline{\Delta}_{SAT} \quad (3.52)$$

vorliegt, der eine Abschätzung der systematischen Fehlerwirkung der Satellitenorbits enthält. Die \underline{F} -Matrix bleibt als Transformationsmatrix dabei gegenüber dem vorhergehenden Schritt unverändert und $\underline{\Delta}_{SAT}$ enthält die abgeschätzten systematischen Fehler der Satellitenpositionen (X, Y, Z).

3.4.9 Atmosphärische Refraktion

Die atmosphärische Refraktion bildet bei der GPS-Positionierung über längere Basislinien die dominante Fehlerquelle und wird deshalb mit etwas größerer Breite behandelt.

3.4.9.1 Ionosphäre

Auch bei der Verwendung von Zweifrequenz-Daten spielt die Ionosphäre immer noch eine bedeutende Rolle im Fehlerbudget. Grundsätzlich kann der Fehler erster Ordnung vollständig eliminiert werden, beispielsweise durch Bildung der Linearkombination $L_{77;60}$ (siehe Tabelle 2.2), doch kann dieses virtuelle Signal wegen seiner minimalen Wellenlänge nicht mehr fixiert werden. Bei der kinematischen Positionierung mit Trägerphasenfixierung muss also nach einem Kompromiss gesucht werden. Die im Rahmen dieser Arbeit verfolgte Strategie versucht, eine Linearkombination zu bilden, die noch eine ausreichend große Wellenlänge aufweist, gleichzeitig aber den Ionosphäreinfluss so vermindert, dass er keine Belastung mehr bzgl. der Mehrdeutigkeitslösung darstellt. Bei kurzen Basislinien bis zu einer Distanz von maximal ca. 20 km kann die Verwendung von L_W und auch L_1 sinnvoll sein²⁶, bei längeren können - mit zunehmender Distanz - die Linearkombinationen $L_{2;4}$ ($\lambda \approx 16$ cm, Ionosphärenfehler um -41% verringert), $L_{3;2}$ ($\lambda \approx 13$ cm, -70%), $L_{4;3}$ ($\lambda \approx 11$ cm, -91%), $L_{5;4}$ ($\lambda \approx 10$ cm, -93%) und $L_{9;7}$ ($\lambda \approx 5$ cm, -99%) zum Einsatz kommen.

Die Ionosphäre wird in mehrere Schichten unterteilt. Sie beginnt nach Abbildung 3.18 bei etwa 70 km Höhe und endet bei 1000 km. In diesem Bereich wird die Ausbreitung der GPS-Wellen durch geladene Teilchen beeinflusst. Die dadurch verursachte Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung über einer Antenne folgt nach HOFFMANN-WELLENHOF u.a. [1993]

$$\delta S_{ION}^{z=0} = \int_{ION} n_{ION}(h) \cdot dh - \int_{VAC} dh \quad (3.53)$$

als Differenz zwischen dem Integral der ionosphärischen Refraktion n_{ION} über die Höhe h im Vergleich zur Ausbreitung im Vakuum ($n = 1,0$). Der auf die Gruppengeschwindigkeit (Streckenmessungen) anwendbare Refraktionsindex in der Ionosphäre kann dabei durch eine Potenzreihe

²⁵ zur Analyse der Erdschatten-Geometrie siehe SCHÜLER [2001, Abschnitt 2.4.5]

²⁶ Die *Wide Lane* L_W kann auf Grund der großen Wellenlänge recht einfach fixiert werden. Die Positionen aus dieser Lösung können anschließend als Pseudo-Beobachtungen in die L_1 -Ausgleichung eingeführt werden und so einen positiven Beitrag zur Konvergenz der Mehrdeutigkeitslösung leisten.

$$n_{ION} = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots \quad (3.54)$$

in Abhängigkeit der Wellenfrequenz f approximiert werden, wobei nach BASSIRI und HAJJ [1993] sowie WÜBBENA [1991] der Term erster Ordnung $O\{1/f^2\}$ mit Spitzenwerten von 33 m (L_1) bzw. 54 m (L_2) den mit Abstand größten Einfluss ausübt. Die Terme zweiter Ordnung $O\{1/f^3\}$ werden durch $L_{77;60}$ oder vergleichbare Linearkombinationen nicht eliminiert, liegen aber nur im Bereich von 1 cm bis maximal 3 cm, während Terme dritter Ordnung $O\{1/f^4\}$ mit Maximalwerten von 6 mm - normalerweise jedoch weniger als 1 mm - unproblematisch sind. Da durch die Bildung doppelter Differenzen eine weitere Reduzierung des Fehlereinflusses auftritt, soll an dieser Stelle die Konzentration auf Effekte erster Ordnung liegen,

$$n_{ION} \approx 1 + \frac{c_2}{f^2} = 1 + \frac{C \cdot N_E}{f^2} \quad (3.55)$$

der mit der Konstante $C = 40,28$ und Kenntnis der Elektronendichte N_E berechnet werden kann. Die ionosphärische Laufzeitverzögerung für Trägerphasen-Messungen in Zenitrichtung ergibt sich nun zu

$$\delta S_{ION}^{Z=0} = \int_{h_A}^{\infty} \frac{c_2}{f^2} \cdot dh = \frac{C}{f^2} \cdot \int_{h_A}^{\infty} N_E(h) \cdot dh = \frac{C}{f^2} \cdot VTEC \quad (3.56)$$

mit der Starthöhe der Station (h_A). Der VTEC ist der *Vertical Total Electron Content*²⁷.

Gegenwärtig liegen keine frei zugänglichen ionosphärischen Korrekturprodukte mit einer Genauigkeit vor, die den Einsatz zur hochpräzisen Positionierung mit Original-Trägerphasen über längere Entfernungen hinweg gestatten würden, so dass der stochastischen Modellierung eine nicht unwesentliche Bedeutung zukommt. Das bekannte Klobuchar-Modell, dessen Modellkoeffizienten mit der Broadcast-Message verschickt werden, kann nach SEEGER [1989] nur etwa 50% der Laufzeitverzögerung kompensieren. Die vom IGS verbreiteten IONEX-Karten enthalten den VTEC und erzielen eine höhere Genauigkeit, stoßen aber kaum in den Sub-Dezimeter-Bereich vor. Auch bleiben deutliche Unsicherheiten in der Abbildungsfunktion für Satelliten unter niedrigem Sichtwinkel. Als Alternative kann die Bestimmung der ionosphärischen Laufzeitverzögerungen in den doppelten Differenzen über die Kombination von Strecken- und Trägerphasenmessungen angesehen werden, die bei den zwei Linearkombinationen $L_{4;3}$ und $L_{5;4}$ bereits ausreichend sein könnte, um auch die Positionierung über sehr lange Basislinien von mehreren hundert Kilometer zuzulassen.

3.4.9.1.1 Abspaltung des deterministischen Anteils

Zur Ableitung einer Korrelationsfunktion der Ionosphäre in Abhängigkeit von der Entfernung (räumliche Dekorrelation der Laufzeitverzögerung) wird zunächst ein funktionaler Anteil abgespalten, der nachfolgend auch als AIM (*Annual Ionosphere Model*) bzw. »Jahresmodell« bezeichnet wird. Als Grundlage dienen jährliche Datensätze von IONEX-Karten²⁸ mit einer räumlichen Auflösung von $2,5^\circ$ (Breite) \times $5,0^\circ$ (Länge) und einem entsprechenden Abdeckungsbereich von $\varphi = 87,5^\circ$ N bis $87,5^\circ$ S (geozentrische Breite) sowie $\lambda = 175^\circ$ W bis 180° O sowie einer zeitlichen Auflösung von 2 Stunden.

Für jeden Gitterpunkt werden jährlich abgeschlossene Datensätze benutzt und der VTEC zur Epoche k durch

$$\begin{aligned} VTEC_k &= a + b \cdot \cos[\omega_T \cdot (t_H - \Delta t_H)] \\ a &= a_M + a_L \cdot (\omega_j \cdot t_j) + a_P \cdot (\omega_j \cdot t_j)^2 + a_S \cdot \sin(\omega_j \cdot t_j) + a_C \cdot \cos(\omega_j \cdot t_j) \\ b &= b_M + b_L \cdot (\omega_j \cdot t_j) + b_P \cdot (\omega_j \cdot t_j)^2 + b_S \cdot \sin(\omega_j \cdot t_j) + b_C \cdot \cos(\omega_j \cdot t_j) \end{aligned} \quad (3.57)$$

²⁷ Einheit: 1 TECU = 10^{16} Elektronen/m²; auf L_1 entspricht 1 TECU ungefähr einer Laufzeitverzögerung von 0,16 m in Zenitrichtung, auf L_2 bereits 0,27 m.

²⁸ In diesem Fall werden die Ergebnisse des CODE-Rechenzentrums benutzt.

ohne Rotation des Koordinatensystems modelliert. Dabei betragen die benutzten Kreisfrequenzen

$$\omega_T = \frac{2\pi}{24 [h]} \approx 0,2618 \left[\frac{1}{h} \right]; \quad \omega_J = \frac{2\pi}{365,25 [d]} \approx 0,0172024 \left[\frac{1}{d} \right] \quad (3.58)$$

und die einfließenden Zeitangaben sind t_H als Tageszeit in Stunden und t_J als Tag des Jahres mit dem entsprechenden Tagesbruchteil $t_H/24$.

Ein Blick auf die Funktionsgleichung zeigt, dass die Ionosphärenaktivität durch einen Offset a und eine tägliche Variation mit der Amplitude b beschrieben wird. Der Offset ist nicht über das Jahr konstant, sondern ebenso wie die Amplitude b eine Funktion der Zeit, wobei die Trend-Koeffizienten erster und zweiter Ordnung zur Kompensation langperiodischer Veränderungen dienen²⁹ und über die harmonischen Koeffizienten mögliche saisonale Schwankungen erfasst werden sollen³⁰. Die täglichen Variationen spiegeln den Sonnengang wider, der für diese Änderungen in der Ionosphärenaktivität in Form minimaler Laufzeitverzögerungen während der Nachtstunden und maximaler Werte während des lokalen Mittags maßgeblich verantwortlich ist. In Tabelle 3.6 wurden die insgesamt 11 Parameter pro Gitterpunkt und Jahr als Übersicht zusammengestellt.

Durch die Bestimmung der Modellkoeffizienten steht nun ein globales Ionosphärenmodell zur Verfügung, das in der Lage ist, den mittleren Jahrestrend sowie die mittlere tägliche Fluktuation wiederzugeben. Abbildung 3.12 zeigt die VTEC Werte (rot) sowie die ausgeglichene Trendfunktion der Ionosphärenaktivität (grün) für das Jahr 2003 am Modellgitterpunkt 47,5° N (geozentrische Breite) und 10,0° O. In der Ausschnittsvergrößerung (Abbildung 3.13) werden die Tagesvariationen der Ein-

<i>Funktionsteil</i>	<i>Parameter</i>	<i>Symbole</i>
<i>Offset</i>	<i>Mittelwert/Absolutglied</i>	a_M
	<i>linearer Trend-Koeffizient</i>	a_L
	<i>parabolischer Trend-Koeffizient</i>	a_P
	<i>saisonale Koeffizienten</i>	a_S, a_C
<i>Amplitude</i>	<i>Mittelwert/Absolutglied</i>	b_M
	<i>linearer Trend-Koeffizient</i>	b_L
	<i>parabolischer Trend-Koeffizient</i>	b_P
	<i>saisonale Koeffizienten</i>	b_S, b_C
<i>Tagesvariation</i>	<i>Phasenverschiebung</i>	Δt_H

Tabelle 3.6: Beschreibung der Parameter für die funktionale Modellierung der VTEC-Zeitreihen pro Gitterpunkt.

gangsdaten und jene der Ausgleichsfunktion gegenübergestellt. Die Amplituden stimmen im gewählten Zeitfenster recht gut überein, doch zeigen sich in den Eingangsdaten Schwankungen mit längeren Periodendauern. Die bestimmte Trendfunktion zeigt in diesem Ausschnitt teilweise eine leichte Phasenverschiebung gegenüber den VTEC-Beobachtungen.

Der bestimmte mittlere Offset a_M für die einzelnen Gitterpunkte findet sich Abbildung 3.8 und zeigt Minima im Bereich des geomagnetischen Äquators sowie maximale Werte in zwei Gürteln südlich davon bis zu einer Breite von ca. 70° S. Der Koeffizient b_M gibt die mittlere Amplitude der Tagesvariationen an und wurde in Abbildung 3.9 veranschaulicht. In den meisten Gebieten überschreiten diese einen Wert von 8 TECU nicht, allerdings können »Linsen« mit teilweise deutlich stärkeren Tagesvariationen mit Extremwerten bis zu 18 TECU identifiziert werden, beispielsweise in der Drake Passage. Das in Abbildung 3.10 veranschaulichte Bestimmtheitsmaß gibt an, welcher Anteil der Varianz durch den Modellansatz erklärt wird. Für den Großteil des Gebietes betragen diese Maße

²⁹ Die Aktivität der Ionosphäre wird durch die Dichte der Sonnenflecken bedingt. Der Sonnenfleckenzyklus beträgt ungefähr 12 Jahre. Die Trendkoeffizienten sollen etwaige Einflüsse dieser Periodizität, die sich im Zeitraum eines Jahres bemerkbar machen könnten, auffangen.

³⁰ Ansatz entstammt der Troposphärenmodellierung (siehe Abschnitt 3.4.9.2)

mehr als 80%, im äquatorialen Bereich grundsätzlich über 85%, d.h. dort verbleiben nur noch etwa 15% der Streuung, die von dem gewählten - vergleichsweise einfachen Ansatz - nicht »erklärt« werden können. Das Minimum mit weniger als 45% wird nördlich von Norwegen erreicht. In Abbildung 3.11 folgt schließlich eine Darstellung der Standardabweichung der Gewichtseinheit, die verdeutlicht, welcher Restfehler nach Abspaltung der deterministischen Anteile verbleibt. Diese Präzisionsmaße liegen im Bereich der nördlichen bzw. südlichen Hemisphäre bei Breiten über 40° grundsätzlich bei 5 TECU und weniger, während im Äquatorbereich die größten Standardabweichungen mit ihrem Maximum über Hawaii von mehr als 12 TECU auftreten. Obwohl die Bestimmtheitsmaße dort also am höchsten sind, verbleiben dennoch in diesen Regionen auf Grund der stärkeren Aktivität stärkere Restfehler.

Die gitterförmig angeordneten Modellpunkte können auf einfache Weise, beispielsweise durch über die Entfernung gewichtete Mittelbildung oder durch lineare Interpolation auf die gewünschte Position interpoliert werden. Dazu ist die Ermittlung des ionosphärischen Durchstoßpunktes erforderlich. Wenn die Ionosphäre - wie in Abbildung 3.7 dargestellt - als Ein-Schichten-Modell vereinfacht wird, so kann diese Berechnung einfach durchgeführt werden. Da sich diese effektiv wirksame Ionosphärenschicht - hier als Zentralschicht bezeichnet - in relativ großer Höhe - im Allgemeinen wird sie zumeist zwischen 350 bis 450 km angesetzt - befindet, weicht der Projektionspunkt des direkten Sichtstrahls von der GPS-Antenne zum Satelliten auf die Erdoberfläche nicht unwesentlich vom Standort der Antenne ab. Für den Satelliten i und dem Verbindungsvektor

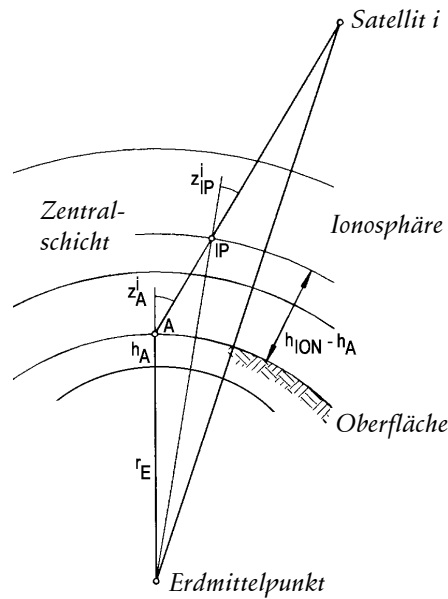


Abbildung 3.7: Geometrischer Zenitwinkel der Bodenstation A zum Satelliten i und ionosphärischer Zenithwinkel z_{IP} von der Zentralschicht der Ionosphäre zum Satelliten nach HOFFMANN-WELLENHOF u.a. [1993]. Die Projektion der Ionosphärenpunktes IP auf die Erdoberfläche ergibt die zur Interpolation in den Gitterdaten benötigten Horizontalkoordinaten.

\underline{X}_A^i vom Standort A mit seiner ellipsoidischen Breite φ_A und Länge λ_A zum Satelliten i ergibt sich das Azimut

$$\tan \alpha_A^i = \frac{-\sin \lambda_A \cdot \Delta X_A^i + \cos \lambda_A \cdot \Delta Y_A^i}{-\sin \varphi_A \cdot \cos \lambda_A \cdot \Delta X_A^i - \sin \varphi_A \cdot \sin \lambda_A \cdot \Delta Y_A^i + \cos \varphi_A \cdot \Delta Z_A^i} \quad (3.59)$$

Nach LEINEN [1997] ergibt sich dann die Breite des Ionosphärenpunktes IP aus

$$\sin \varphi_{IP}^i = \sin \varphi_A \cdot \cos \Delta z_{IP}^i + \cos \varphi_A \cdot \sin \Delta z_{IP}^i \cdot \cos \alpha_A^i \quad (3.60)$$

und die Länge zu

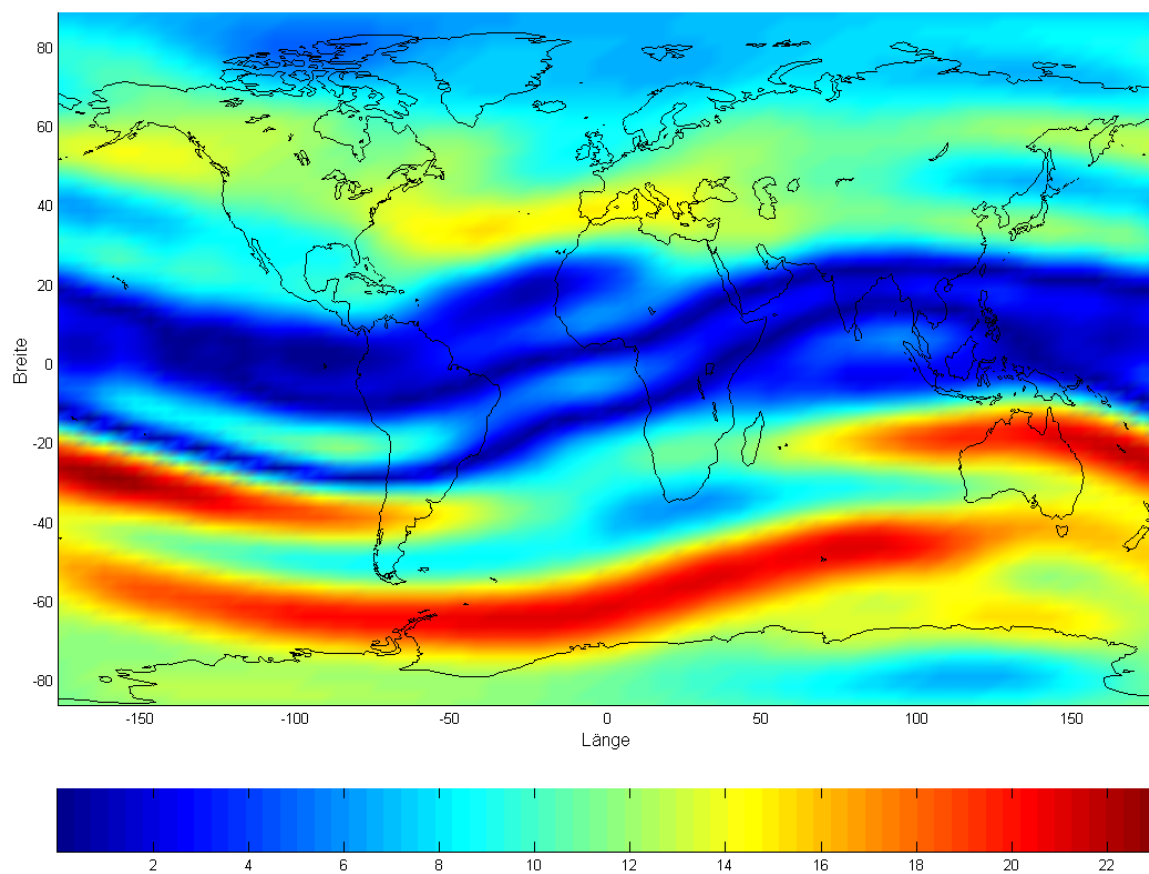


Abbildung 3.8: Karte des Koeffizienten a_M (mittlerer Offset) in [TECU].

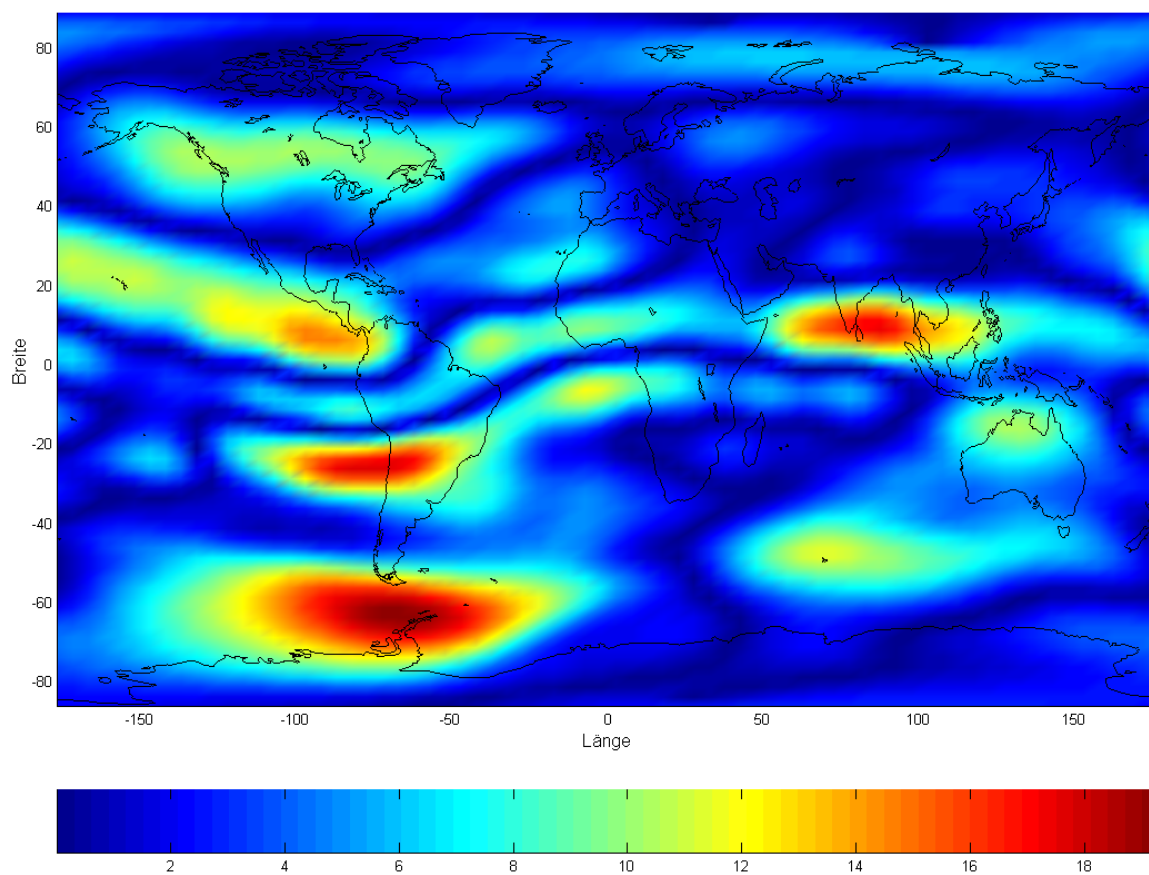


Abbildung 3.9: Karte des Koeffizienten b_M (mittlere Amplitude) in [TECU].

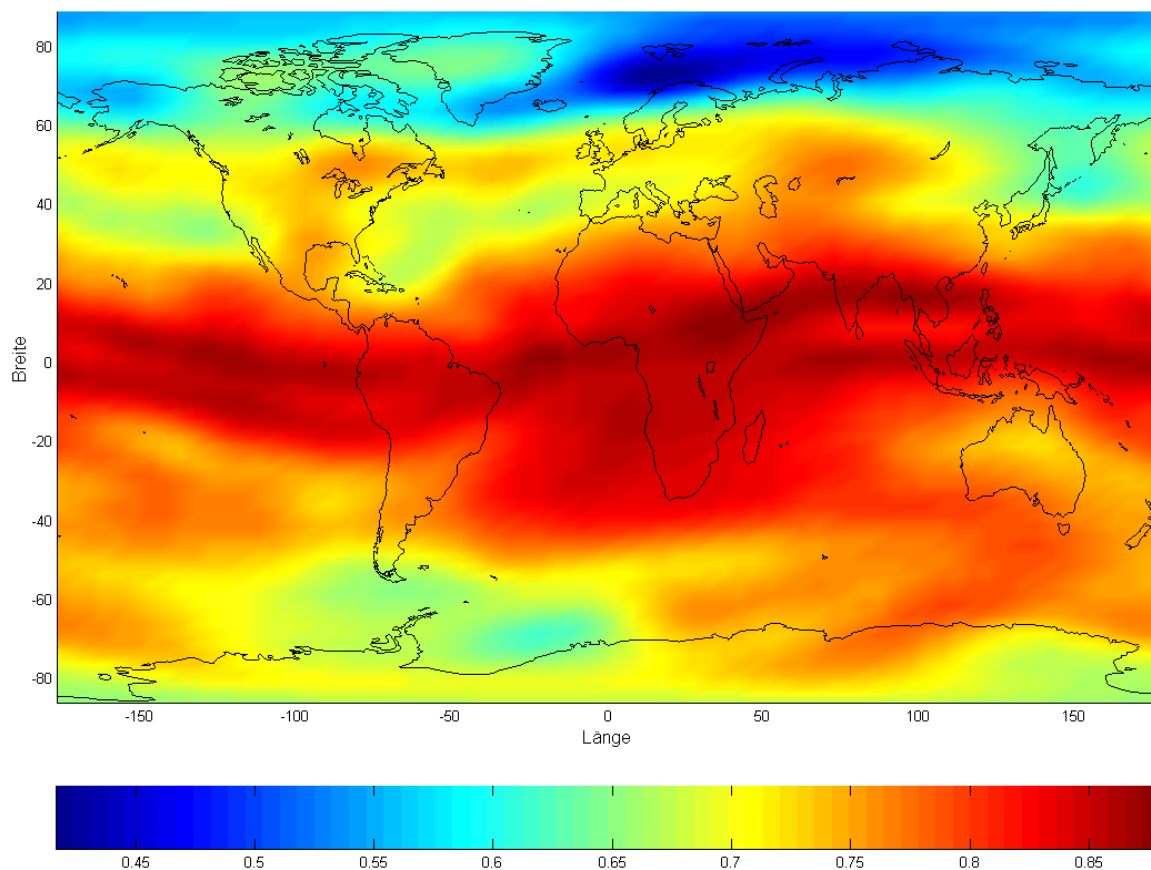


Abbildung 3.10: Karte des Bestimmtheitsmaßes (Anteil erklärter Varianz).

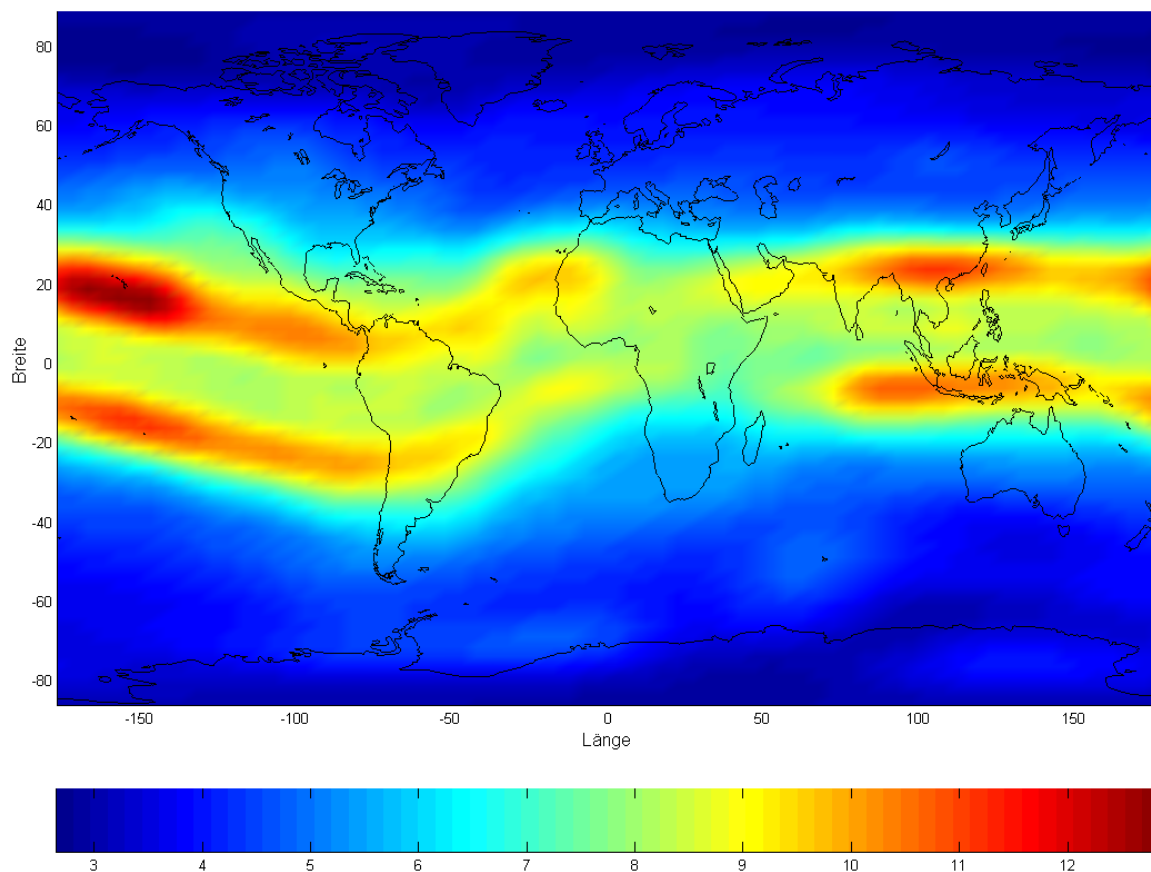


Abbildung 3.11: Karte der Standardabweichung der Gewichtseinheit in [TECU].

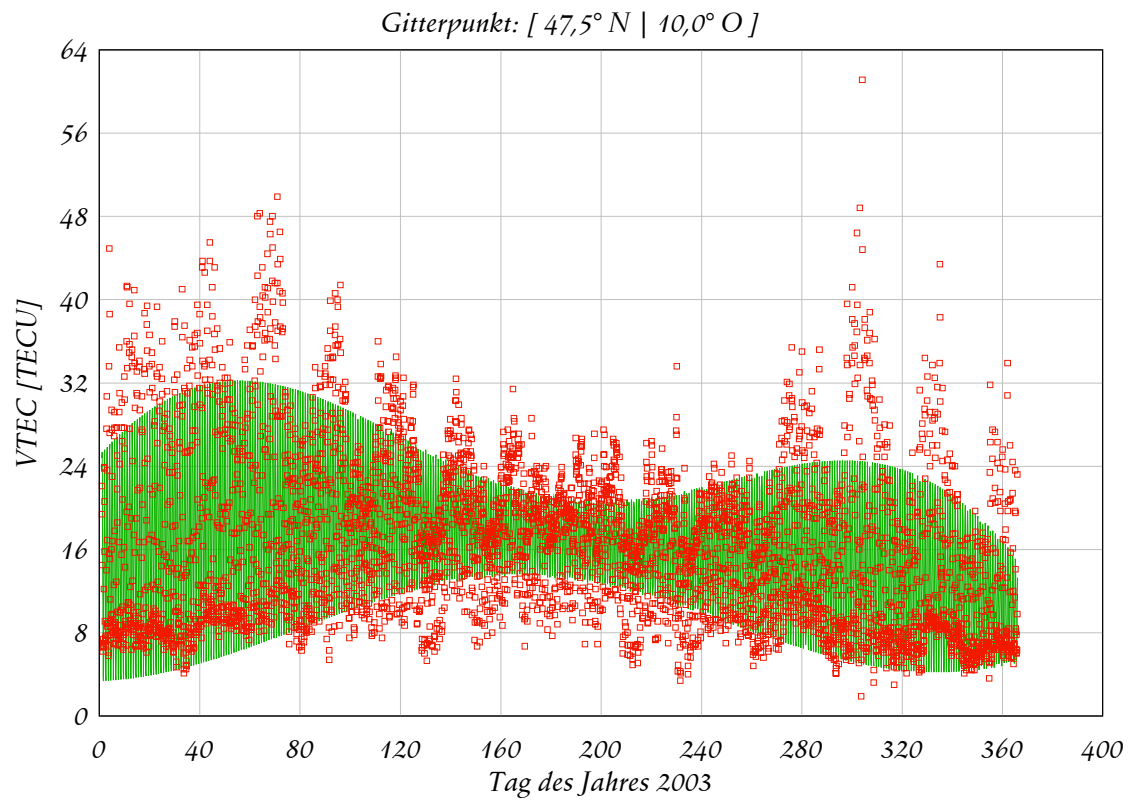


Abbildung 3.12: Gegebene VTEC-Werte (rot) und ausgeglichene Modellfunktion (grün).

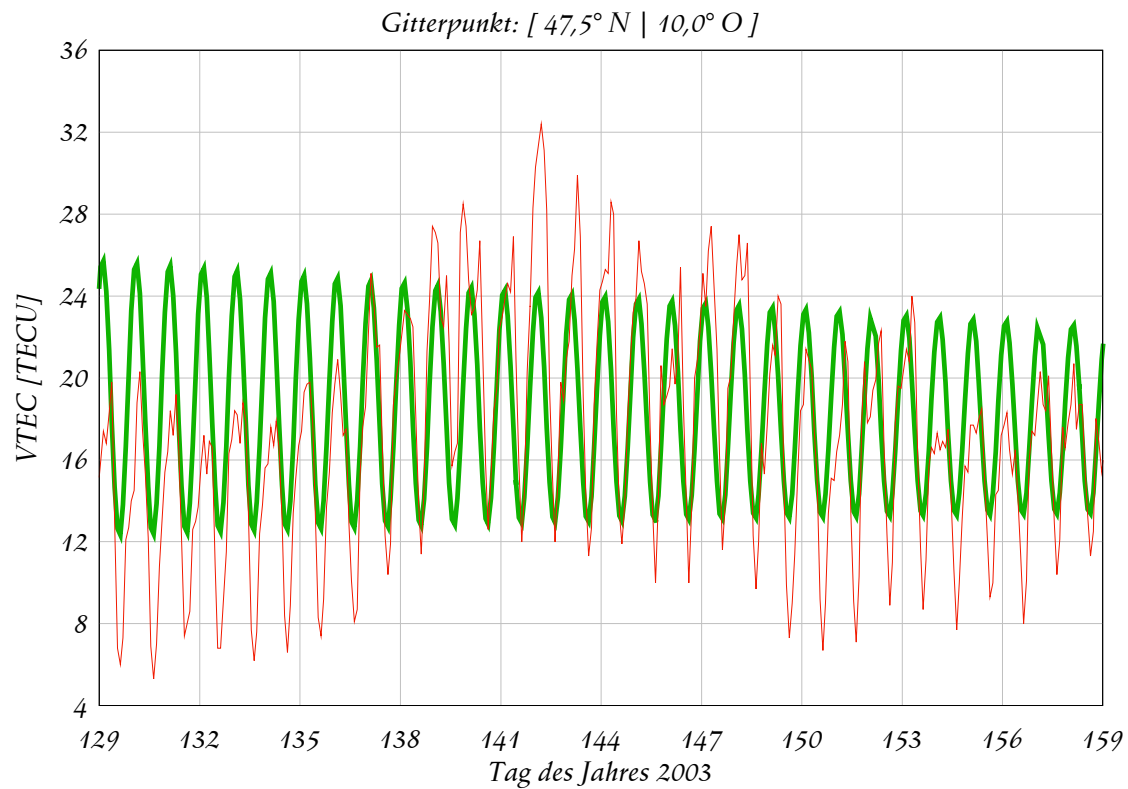


Abbildung 3.13: Ausschnitt im Zeitfenster von DoY 129 bis 159 zur Veranschaulichung der tatsächlichen Tagesvariationen (rot) und der ausgeglichenen Trendfunktion (grün).

$$\lambda_{IP}^i = \lambda_A + \arcsin \left(\frac{\sin \Delta z_{IP}^i \cdot \sin \alpha_A^i}{\cos \varphi_{IP}} \right) . \quad (3.61)$$

Der anzusetzende Differenz-Zenitwinkel Δz_{IP} folgt aus der geometrischen Zenitdistanz

$$\cos z_A^i = \frac{\cos \varphi_A \cdot \cos \lambda_A \cdot \Delta X_A^i + \cos \varphi_A \cdot \sin \lambda_A \cdot \Delta Y_A^i + \sin \varphi_A \cdot \Delta Z_A^i}{S_A^i} \quad (3.62)$$

mit S_A^i als Entfernung zwischen Standpunkt und Satellit über die Formel

$$\sin z_{IP}^i = \frac{r_E + h_A}{r_E + h_{ION}} \cdot \sin z_A^i \quad \wedge \quad \Delta z_{IP}^i = z_A^i - z_{IP}^i \quad (3.63)$$

mit r_E als Erdradius und h_A als Standorthöhe sowie h_{ION} als Höhe der ionosphärischen Zentralschicht. Auf Grund der Repräsentation des Datengitters unter Nutzung der geozentrischen Breite müssen die Koordinaten des Punktes IP im Allgemeinen noch entsprechend über

$$\tan \varphi_{IP}^{i*} = (1 - f_{WGS})^2 \cdot \tan \varphi_{IP}^i \quad (3.64)$$

transformiert werden, wobei φ^* die geozentrische Breite und f_{WGS} die Abplattung des WGS84-Ellipsoids symbolisieren. Mit z_{IP} kann der gegebene VTEC auch von der Zenitrichtung in die Sichrichtung zum Satelliten umgerechnet werden, so dass sich

$$\delta S_{A[ION]}^i = m_{ION}(z_{IP}^i) \cdot \delta S_{ION}^{z=0} = \frac{1}{\cos z_{IP}^i} \cdot \delta S_{ION}^{z=0} = \frac{C}{f^z} \cdot \frac{1}{\cos z_{IP}^i} \cdot VTEC \quad (3.65)$$

mit der Abbildungsfunktion $1/\cos z_{IP}$ die ionosphärische Laufzeitverzögerung in Sichrichtung zum Satelliten ergibt.

3.4.9.1.2 Stochastisches Modell für die Ionosphäre

Die nach der Abspaltung des systematischen Anteils verbleibenden Restfehler, also die im Rahmen des Ausgleichsprozesses verbleibenden Verbesserungen

$$v_k = VTEC_{MODEL} - VTEC_{BEOB} = a + b \cdot \cos [\omega_T \cdot (t_H - \Delta t_H)] - VTEC_{BEOB} \quad (3.66)$$

stellen Zeitreihen für die einzelnen Gitterpunkte dar. Die räumliche Korrelationsanalyse reduziert sich bei diesem Zentralschicht-Modell auf die horizontalen Komponenten. Die Korrelation zwischen den einzelnen Gitterpunkten kann dabei durch Berechnung der Kreuz-Korrelationsfunktion

$$\rho_{i,2}(k) = \frac{1}{n-k-1} \cdot \frac{1}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} \cdot \sum_{i=1}^{n-k} v_i(i) \cdot v_2(i+k) \quad (3.67)$$

geschehen, wobei n ist die Anzahl der Werte der Zeitreihe und k der zum Berechnungszeitpunkt t_k gehörige Index ist. Die Standardabweichung der beiden Zeitreihen werden mit σ_1 und σ_2 notiert. Interessiert lediglich die räumliche Korrelation zwischen zwei Gitterpunkten zu einem identischen Zeitpunkt³⁴, so wird $k=0$ und die Gleichung vereinfacht sich auf

$$\rho_{i,2}(0) = \frac{1}{n-1} \cdot \frac{1}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} \cdot \sum_{i=1}^n v_i(i) \cdot v_2(i) \quad (3.68)$$

³⁴ Zeitliche Korrelationen zwischen den einzelnen Beobachtungsepochen bleiben im Rahmen dieser Arbeit ohne Berücksichtigung, da sie neben der Erhöhung des Speicherplatzes primär zu einer deutlichen Erhöhung der Rechenzeit führen.

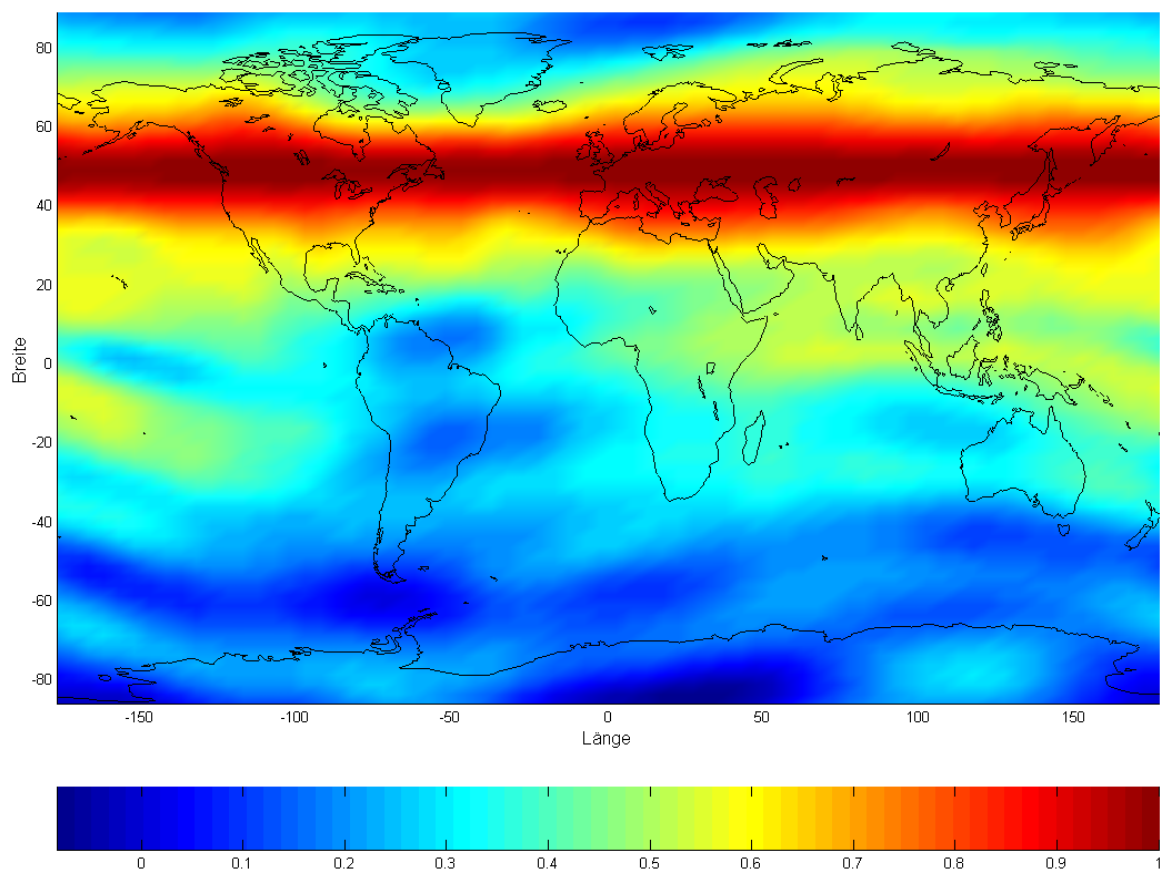


Abbildung 3.14: Korrelationskoeffizienten relativ zum geozentrischen Breitengrad $47,5^\circ \text{ N}$.

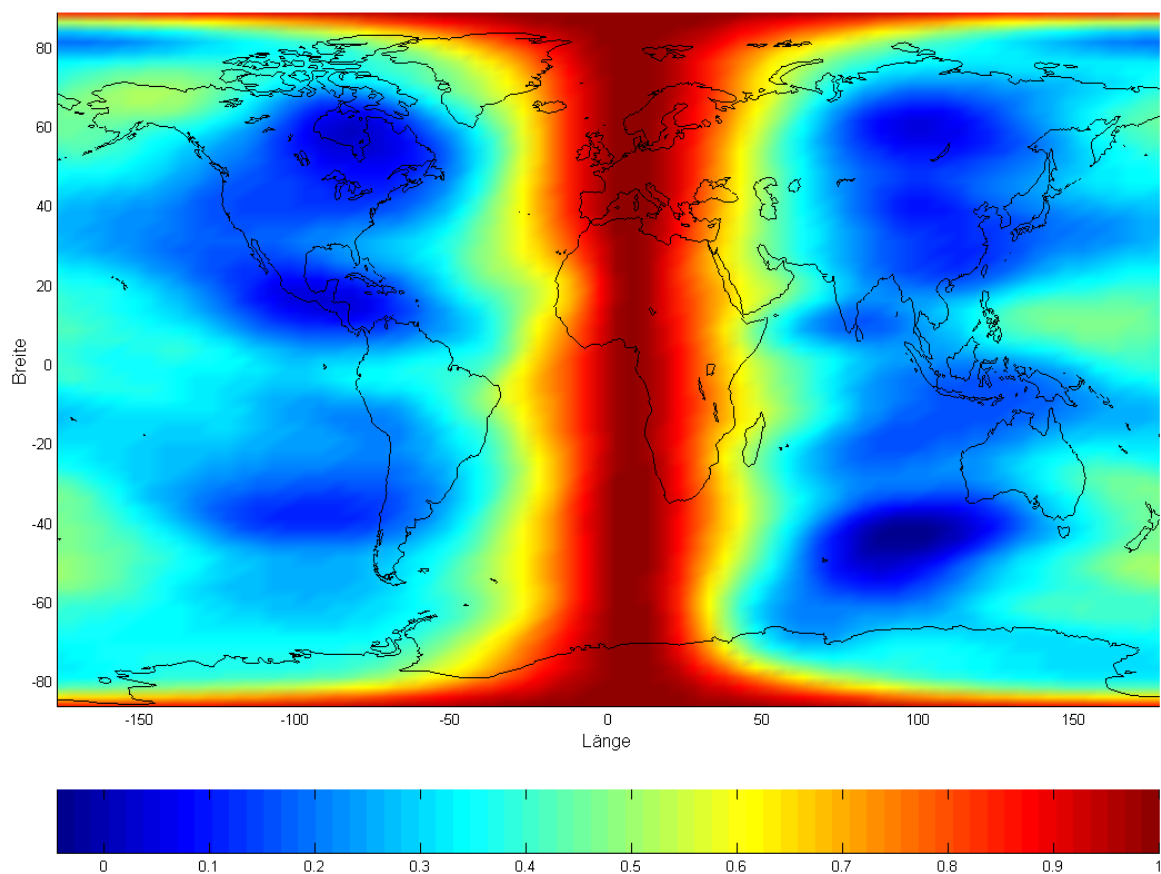


Abbildung 3.15: Korrelationskoeffizienten relativ zum Längengrad $10,0^\circ \text{ O}$.

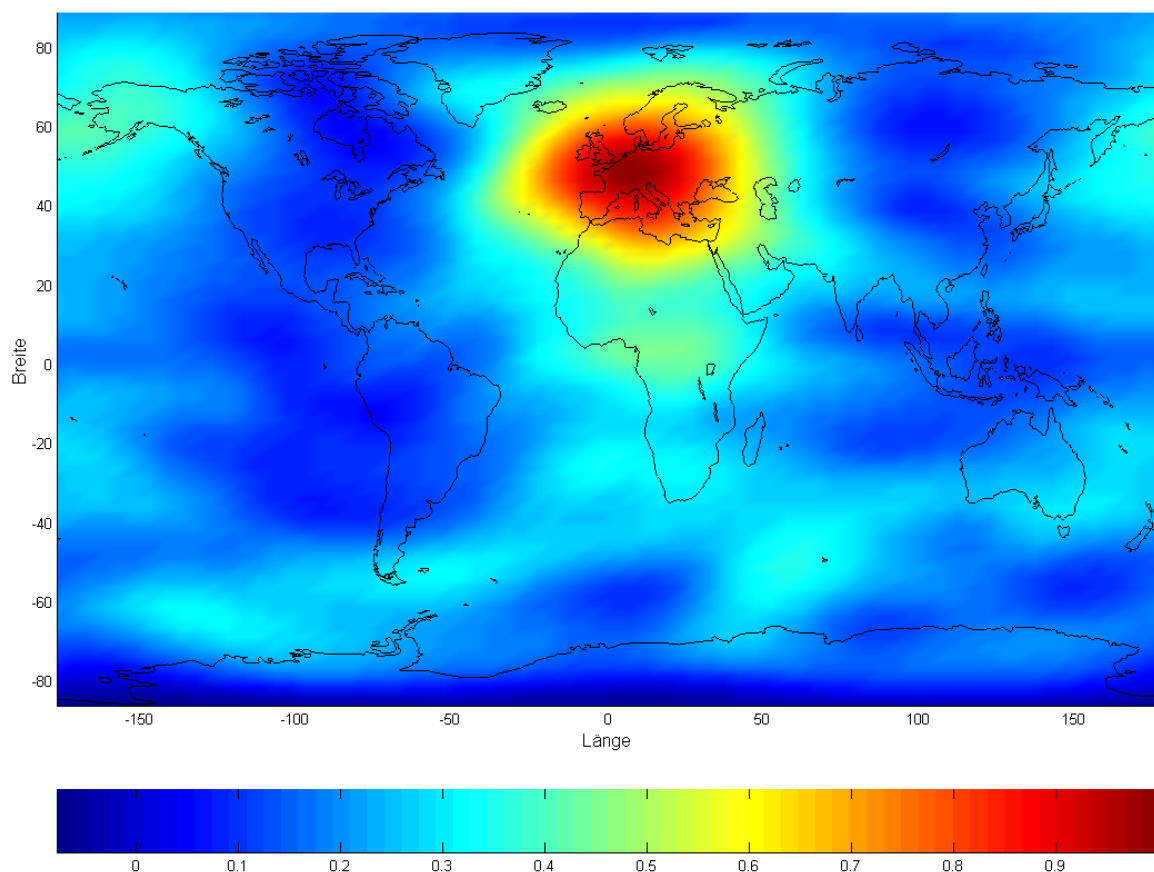


Abbildung 3.16: Korrelationskoeffizienten zwischen den einzelnen Modellgitterpunkten relativ zum Gitterpunkt mit den Koordinaten $47,5^\circ$ N und $10,0^\circ$ O aus der Modellrechnung für 2003.

Auf diese Weise können nun die räumlichen Korrelationen zwischen den einzelnen Punkten des Modellgitters (Auflösung N/S: $2,5^\circ$; W/O: $5,0^\circ$) bestimmt werden. Abbildung 3.14 zeigt die ermittelten Korrelationen in Nord-Süd-Richtung auf einem regelmäßigen Gitter unter Verwendung der Zylinderprojektion. Die Berechnung wurde jeweils relativ zu einem Gitterpunkt auf dem Breitengrad $47,5^\circ$ N durchgeführt, von dem ausgehend dann die Kreuz-Korrelationskoeffizienten in nördlicher bzw. südlicher Richtung bestimmt wurden. Für den entsprechenden Punkt auf dem zentralen Breitengrad beträgt er somit stets 1,0 und in nördlicher bzw. südlicher Richtung müsste sich eine Abnahme ergeben, die auch tatsächlich ersichtlich ist. Als Ergebnis kann bei Betrachtung der Karte eine hohe Korrelation von 0,9 und mehr im Nahbereich von ca. 10° (teilweise auch mehr) - also über gut 1000 km - festgestellt werden. Abbildung 3.15 stellt die Ergebnisse einer ähnlichen Berechnung vor, doch erfolgte hier die Bestimmung der Korrelationen in West-Ost-Richtung - Breitengrad für Breitengrad - relativ zum Längengrad 10° O. Auf Grund der Verjüngung zu den beiden Polen hin ergibt sich scheinbar eine Erhöhung der räumlichen Korrelationen in diesen Gebieten³².

Die Ableitung einer Funktion, die unabhängig von der Richtung in alleiniger Abhängigkeit von der Entfernung die Bestimmung der Korrelationskoeffizienten ermöglicht, würde die stochastische Modellierung deutlich erleichtern. In Abbildung 3.16 wurden die Koeffizienten eingetragen, die zuvor relativ zum Zentralpunkt mit den Koordinaten $47,5^\circ$ N und $10,0^\circ$ O ermittelt wurden, d.h. die Darstellung enthält die Kreuz-Korrelationen zwischen den Gitterpunkten und dem Zentralpunkt. Dabei wird wiederum die relativ starke räumliche Korrelation der Ionosphäre deutlich.

Aus den gewonnenen und in Abbildung 3.17 dargestellten Daten kann nun die »vermittelnde« Korrelationsfunktion ermittelt werden. Die Betrachtung der Grafik legt nahe, dass eine stückweise Modellierung - wie eingezeichnet - sinnvoll wäre:

³² Ein Breitenkreis bei $87,5^\circ$ hat lediglich einen Umfang von ca. 1750 km, bei $47,5^\circ$ sind es bereits 27.000 km und am Äquator bekanntlich ungefähr 40.000 km bei einem angenommenen Erdradius von 6371 km.

$$\rho(\Delta s) = \begin{cases} \exp \left[-0,09 \cdot \left(\frac{\Delta s}{1000 [km]} \right)^2 \right] & \text{für } \Delta s \leq 4000 \text{ km} \\ -0,00407 \cdot \left(\frac{\Delta s}{1000 [km]} \right) + 0,253207758 & \text{für } \Delta s > 4000 \text{ km} \end{cases} \quad (3.69)$$

Das Symbol Δs kennzeichnet die stets positive sphärische Distanz zwischen den Ionosphärenpunkten in Kilometern (R : Erdradius/Krümmungsradius in Kilometern):

$$\cos \frac{\Delta s_{AB}}{R} = \sin \varphi_A \cdot \sin \varphi_B - \cos \varphi_A \cdot \cos \varphi_B \cdot \cos(\lambda_B - \lambda_A) \quad (3.70)$$

Im Entfernungsbereich bis 4000 km kann die Approximation mit Hilfe einer Exponentialfunktion erfolgen. Da die sichtbare Krümmung der Daten jedoch nicht mit der klassischen GAUSS-MARKOV-Funktion

$$\exp(-\alpha \cdot \Delta s) \quad (3.71)$$

beschrieben werden kann, erfolgt hier die Nutzung der veränderten Funktion

$$\exp(-\alpha \cdot \Delta s^2) \quad , \quad (3.72)$$

die bereits aus diesem Grunde von SOLBRIG [2000] zur Bestimmung troposphärischer Korrelationen vorgezogen wurde. Für Entfernungen über 4000 km wird die Beziehung zum Korrelationskoeffizienten über die gegebene lineare Funktion realisiert³³; die hohe Zahl an Nachkommastellen wurde zur Minimierung von Unstetigkeiten beim Übergang von der ersten zur zweiten Funktion angegeben.

Die Aufstellung einer voll besetzten Kovarianzmatrix (symmetrisch, signalisiert durch unterstrichene Diagonalelemente) für die Ionosphäre ist nun möglich:

$$\underline{\Sigma}_{VTEC} = \begin{bmatrix} \underline{\sigma_{IP_A^i}^2} & \rho(\Delta s_{IP_A^i, IP_A^j}) \cdot \underline{\sigma_{IP_A^i}} \cdot \underline{\sigma_{IP_A^j}} & \rho(\Delta s_{IP_A^i, IP_A^k}) \cdot \underline{\sigma_{IP_A^i}} \cdot \underline{\sigma_{IP_A^k}} & \cdots \\ & \underline{\sigma_{IP_A^j}^2} & \rho(\Delta s_{IP_A^j, IP_A^k}) \cdot \underline{\sigma_{IP_A^j}} \cdot \underline{\sigma_{IP_A^k}} & \cdots \\ & & \underline{\sigma_{IP_A^k}^2} & \cdots \\ & & & \ddots \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

Dabei bezeichnet IP_A^i beispielsweise den Ionosphärenpunkt, der sich von Station A bei Beobachtung des Satelliten i ergibt und die zugehörige Varianz σ^2 bezieht sich auf jene des an den Koordinaten von IP_A^i interpolierten VTEC. Die Transformation in den Beobachtungsraum über Fehlerfortpflanzung kann durch Aufstellung der Funktionalmatrix \underline{F} unter Berücksichtigung der bereits eingeführten Berechnungsformel

$$\delta S_{A[ION, LK]}^i = \frac{40,28}{f_{LK}^2 \cdot \cos z_{IP_A^i}} \cdot VTEC_{IP_A^i} \quad (3.74)$$

erfolgen, die noch in eine doppelte Differenzform inkl. linearer Kombination überführt werden muss. Dann ergibt sich die Matrix

³³ In diesem Entfernungsbereich zeigen sich bei den aus der Kreuzkorrelationsanalyse stammenden Werten deutliche Streuungen, was allerdings in der Praxis nur bei sehr großen Netzwerken von Bedeutung wäre. Bei der Annahme, dass die Sub-Ionosphärenpunkte um ca. 1000 km variieren und die Entfernung zwischen Referenzstation und Rover einige 100 km nicht überschreitet, wäre lediglich das erste Stück der definierten Korrelationsfunktion von Relevanz.

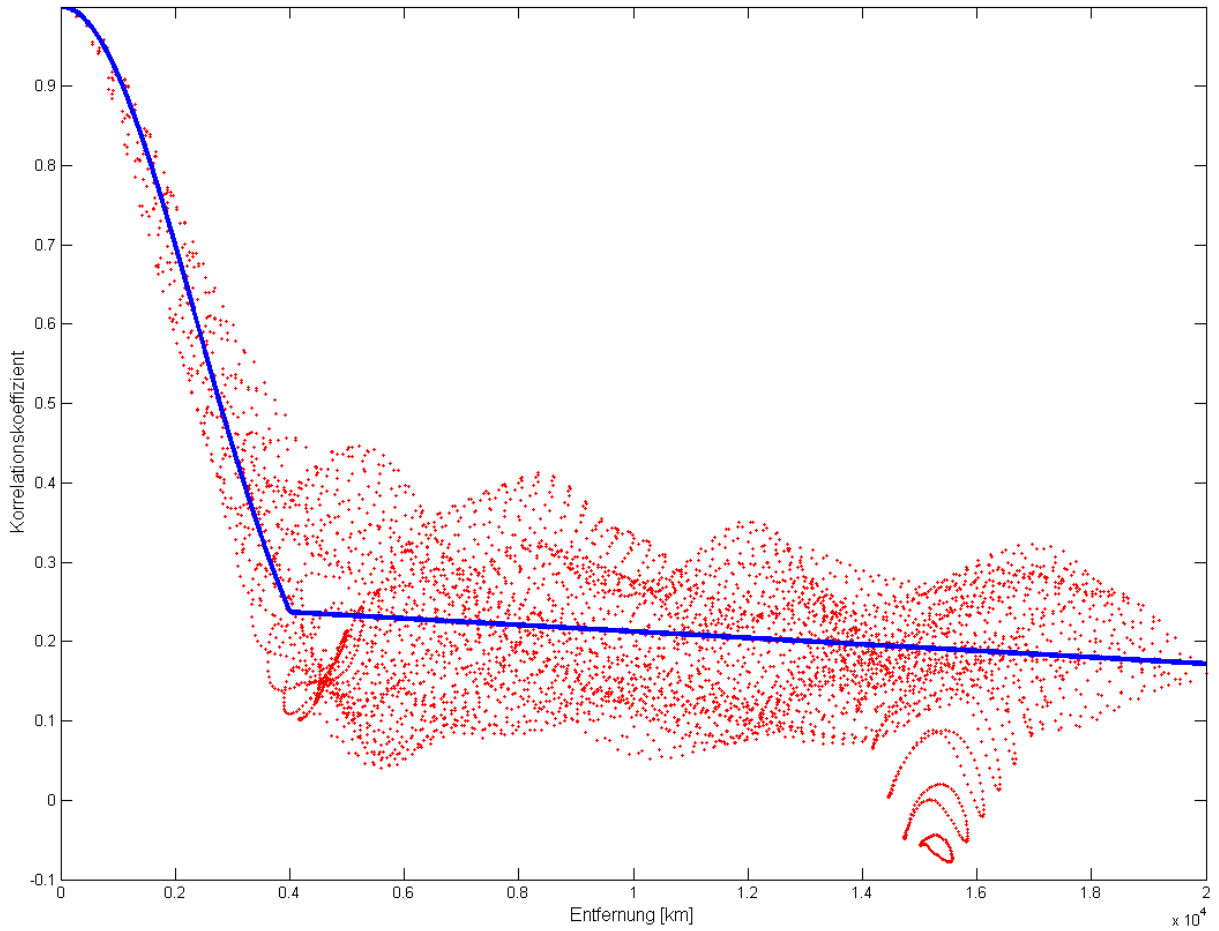


Abbildung 3.17: Bestimmte Korrelationskoeffizienten, aufgetragen in Abhängigkeit von der Entfernung in 10^4 km, und stückweise Ausgleichsfunktion.

$$\begin{aligned}
 \underline{F} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial \nabla \Delta S_{AB[ION,LK]}^{ij}}{\partial VTEC_{IP_A^i}} & \frac{\partial \nabla \Delta S_{AB[ION,LK]}^{ik}}{\partial VTEC_{IP_A^i}} & \frac{\partial \nabla \Delta S_{AB[ION,LK]}^{il}}{\partial VTEC_{IP_A^i}} & \dots \\ \frac{\partial \nabla \Delta S_{AB[ION,LK]}^{ij}}{\partial VTEC_{IP_A^j}} & \frac{\partial \nabla \Delta S_{AB[ION,LK]}^{ik}}{\partial VTEC_{IP_A^j}} & \frac{\partial \nabla \Delta S_{AB[ION,LK]}^{il}}{\partial VTEC_{IP_A^j}} & \dots \\ \frac{\partial \nabla \Delta S_{AB[ION,LK]}^{ij}}{\partial VTEC_{IP_A^k}} & \frac{\partial \nabla \Delta S_{AB[ION,LK]}^{ik}}{\partial VTEC_{IP_A^k}} & \frac{\partial \nabla \Delta S_{AB[ION,LK]}^{il}}{\partial VTEC_{IP_A^k}} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \frac{\partial \nabla \Delta S_{AB[ION,LK]}^{ij}}{\partial VTEC_{IP_A^i}} & \frac{\partial \nabla \Delta S_{AB[ION,LK]}^{ik}}{\partial VTEC_{IP_A^i}} & \frac{\partial \nabla \Delta S_{AB[ION,LK]}^{il}}{\partial VTEC_{IP_A^i}} & \dots \\ \frac{\partial \nabla \Delta S_{AB[ION,LK]}^{ij}}{\partial VTEC_{IP_A^j}} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \frac{\partial \nabla \Delta S_{AB[ION,LK]}^{ik}}{\partial VTEC_{IP_A^k}} & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} .
 \end{aligned} \tag{3.75}$$

Alternativ zu dem hier beschriebenen Vorgehen zur Ableitung einer Korrelationsfunktion bietet sich die Möglichkeit, diese Daten aus den täglich erzeugten IONEX-Dateien durch Bestimmung der Auto-Korrelationsfunktion in Abhängigkeit von der Entfernung zu bestimmen. Dem Vorteil der Aktualität der Daten steht jedoch die vergleichsweise geringe Stichprobenbreite gegenüber, die zu unsicheren statistischen Aussagen führen kann, während die hier vorgestellte Kreuz-Korrelationsanalyse auf

Zeitreihen basiert, die ein gesamtes Jahr im Zweistundentakt umfasst und so zumindest eine höhere Allgemeingültigkeit beanspruchen kann. In beiden Fällen sei jedoch erwähnt, dass auf Grund der geringen zeitlichen und räumlichen Auflösung die möglicherweise vorhandenen kurzzeitigen und räumlich begrenzten Variationen der Ionosphäre nicht erfasst werden können.

3.4.9.1.3 Systematische Fehlerwirkung

Bei kurzzeitigen kinematischen Positionsbestimmungen können die Restfehler der Ionosphäre häufig systematisch wirken, auch wenn sie ggf. längerfristig eine eher zufällige Streuung zeigen werden³⁴. Alternativ bzw. ergänzend kann es deshalb sinnvoll sein, eine systematische Fehlerfortpflanzung gemäß Abschnitt 3.2.4 durchzuführen. Dabei bleibt die F -Matrix unverändert und im Vektor $\underline{\Delta}$ sind die systematischen Fehler des VTEC enthalten, deren Abschätzung unter Berücksichtigung der Genauigkeit der funktionalen Modellierung durchgeführt werden muss (siehe nachfolgender Abschnitt). In jedem Fall kann die systematische Fehlerfortpflanzung, die getrennt von der stochastischen Modellierung durchgeführt wird, bei kinematischen Messungen von entscheidender Bedeutung für die Fixierung der Mehrdeutigkeiten sein, denn der Prozess der Mehrdeutigkeitsfixierung kann von systematischen Fehlern schnell verzerrt werden. Können diese Fehler einigermaßen abgeschätzt werden, so besteht die Möglichkeit, diesbezüglich zusätzliche Tests durchzuführen, welche die Robustheit der Fixierung erhöhen können (siehe dazu Abschnitt 3.5.3).

3.4.9.1.4 Auswerte-Strategie mit Bezug auf den Ionosphären-Fehler

Der bislang vorgestellte Ansatz besteht aus einem funktionalen und einem stochastischen Teil, der in dieser Form für die Auswertung beliebiger Netze herangezogen werden könnte. Allerdings ermöglicht die vergleichsweise geringe Genauigkeit des funktionalen (deterministischen) Anteils in praktischer Hinsicht aber nur einen Einsatz über kürzere Distanzen zur Referenzstation von wenigen Zehnerkilometern. Rein formal ist die Anwendung über lange Basislinien möglich, doch führt dann die stochastische Modellierung konsequent zu einer deutlichen Erhöhung der Varianzen des stochastischen Modells der Beobachtungen, so dass auch eine Mehrdeutigkeitslösung auf Grund höherer Standardabweichungen der Fließkommalösungen abgelehnt werden würde. Wesentlich ist also grundsätzlich - neben der angemessenen stochastischen Modellierung - auch eine ausreichend genaue Bestimmung der Korrekturen, wobei die zum Einsatz kommende Strategie aber ebenfalls von geeigneten Linearkombinationen Gebrauch machen wird: Zwar kann eine Linearkombination, die den gesamten Ionosphärenfehler erster Ordnung kompensiert, nicht benutzt werden, da sie in praktischer Hinsicht nicht fixierbar ist, aber »verwandte« Kombinationen wie $L_{5,4}$ können durchaus als Erfolg versprechend bezeichnet werden. Die Methodik lässt sich in Abhängigkeit von der Basislinienlänge folgendermaßen differenzieren³⁵:

- a) Solange die Koordinaten der ionosphärischen Subpunkte zu einem identischen Satelliten bei Rover A und Referenzstation B, C, \dots (also bspw. die Punkte IP_A^i und IP_B^i) um nicht mehr als etwa 10 km voneinander abweichen, beträgt der Korrelationskoeffizient zwischen den VTEC-Werten im Durchschnittsfall noch 0,99999 und der zu erwartende Ionosphärenfehler auf L_1 liegt bei lediglich 0,5 cm, für L_2 -Messungen beträgt er ebenfalls noch deutlich weniger als 1 cm in Zenitrichtung. Die Nutzung des zuvor abgeleiteten Jahresmodells mit der entsprechenden stochastischen Modellbildung bietet sich an, alternativ das GPS-Broadcast-Modell (KLOBUCHAR³⁶). Im Nahbereich von wenigen Kilometern kann der Ionosphärenfehler häufig sogar auf Grund der hohen Korrelation völlig vernachlässigt werden, d.h. eine funktionale Modellierung muss nicht erfolgen, sondern eine rein stochastische Behandlung genügt.

³⁴ Dieses systematische Verhalten wird am Beispiel der Troposphärenfehler noch klarer demonstriert.

³⁵ Die hier gemachten Angaben, auch bzgl. der Entfernungsangaben, beziehen sich auf eine Ionosphäre, die keine Szintillationen oder andere abnorme Verhaltensmuster zeigt. Die Standardabweichung des VTEC für das Jahresmodell wurde mit 7 TECU angenommen, die im Bereich Europas nach Abbildung 3.11 zumeist unterboten, für Ionosphärenpunkte über Nordafrika aber bereits erreicht wird.

³⁶ In der Postprozessierung sollten grundsätzlich Klobuchar-Koeffizienten benutzt werden, die vom CODE-Rechenzentrum aus den IONEX-Daten abgeleitet wurden und daher eine höhere Genauigkeit aufweisen als die in Echtzeit übermittelten Broadcast-Daten. Weitere Informationen dazu im WWW: <http://www.cx.unibe.ch/aiub/ionosphere.html#cgim>, zuletzt am 15.07.2004 besucht.

- b) Im Übergangsbereich bis zu Abständen von etwa 100 km liegt die Korrelation noch bei 0,999, die analog zu (a) zu erwartenden Fehlerwerte liegen im Grenzbereich nun aber bereits bei 6 cm (L_1) bzw. 10 cm (L_2), was die korrekte Mehrdeutigkeitsfixierung bereits erschweren kann. Die Benutzung des Jahresmodells mit Einfrequenzdaten bzw. L_W - oder L_N -Linearkombinationen ist nicht mehr ratsam, jedoch kann die Verwendung der genaueren IONEX-Karten noch zu akzeptablen Ergebnissen führen. Alternativ bietet sich die Verwendung von ionosphären-reduzierten Linearkombinationen im Zusammenspiel mit dem Jahres- oder Klobucharmodell an. Geeignete Kandidaten wären - mit zunehmender Entfernung - zunächst $L_{2;1}$ bis ungefähr 30 km, $L_{3;2}$ bis etwa 60 km und schließlich $L_{4;3}$ mit einem zu erwartenden Fehler von 6,5 mm bei 100 km Entfernung. $L_{5;4}$ erlaubt bei dieser Fehlergrenze eine Ausweitung bis zu ca. 150 km.
- c) Im Fernbereich erfüllt keines der frei zugänglichen bzw. hier in Berücksichtigung gezogenen Ionosphärenmodelle die Anforderungen an die hochpräzise kinematische Positionierung. Aus diesem Grunde wird eine gänzlich andere Strategie verfolgt, indem die doppelt differenzierten ionosphärischen Laufzeitverzögerungen mit Hilfe von Zweifrequenzmessungen bestimmt werden. Die Mehrdeutigkeiten dieses Ionosphärensignals werden über einen Glättungsprozess unter Nutzung der Streckenmessungen ermittelt. Wenn die so bestimmten, doppelt differenzierten Ionosphärenfehler im Bereich von 0,3 m lägen, so würde sich ein Restfehler von 3 cm für $L_{4;3}$ und 2 cm für $L_{5;4}$ ergeben (nicht in Zenitrichtung, sondern in Signalrichtung). Bei einem Restfehler von 1,0 m verblieben in der Linearkombination noch 9 cm bzw. 7 cm, was für eine Fixierung in Anbetracht der geringen Wellenlänge um 10 cm allerdings schon zu viel wäre. Als Ausweg bliebe dann noch die Verwendung von $L_{9;7}$, die zu einer Reduktion auf 0,5 cm führen würde und damit auch bei einer Wellenlänge von lediglich 5,4 cm nur unwesentlich negativ beeinflusst würde.

Die Ionosphären-Linearkombination

$$\begin{aligned}\nabla\Delta\phi_{ION} &= \lambda_{L_1} \cdot \nabla\Delta\phi_{L_1} - \lambda_{L_2} \cdot \nabla\Delta\phi_{L_2} \\ &= \lambda_{L_1} \cdot \left(\frac{\nabla\Delta\rho + \nabla\Delta\delta S_{ION,L_1}}{\lambda_{L_1}} - N_{L_1} \right) - \lambda_{L_2} \cdot \left(\frac{\nabla\Delta\rho + \nabla\Delta\delta S_{ION,L_2}}{\lambda_{L_2}} - N_{L_2} \right)\end{aligned}\quad (3.76)$$

ist frei von jeglichen Einflüssen durch Geometrie und Troposphäre. Auf Grund des Zusammenhanges

$$\nabla\Delta\delta S_{ION,L_1} = \frac{C}{f_{L_1}^2} \cdot TEC; \nabla\Delta\delta S_{ION,L_2} = \frac{C}{f_{L_2}^2} \cdot TEC \Rightarrow \nabla\Delta\delta S_{ION,L_2} = \frac{f_{L_1}^2}{f_{L_2}^2} \cdot \nabla\Delta\delta S_{ION,L_1} \quad (3.77)$$

zwischen der ionosphärischen Laufzeitverzögerung auf L_1 und L_2

$$\begin{aligned}\nabla\Delta\phi_{ION} &= -\nabla\Delta N_{L_1} \cdot \lambda_{L_1} + \nabla\Delta N_{L_2} \cdot \lambda_{L_2} - \nabla\Delta\delta S_{ION,L_1} + \frac{f_{L_1}^2}{f_{L_2}^2} \cdot \nabla\Delta\delta S_{ION,L_1} \\ &= -\nabla\Delta N_{ION} + \frac{f_{L_1}^2 - f_{L_2}^2}{f_{L_2}^2} \cdot \nabla\Delta\delta S_{ION,L_1}\end{aligned}\quad (3.78)$$

kann mit ihrer Hilfe die Laufzeitverzögerung bestimmt werden

$$\nabla\Delta\delta S_{ION,L_1} = \frac{f_{L_2}^2}{f_{L_1}^2 - f_{L_2}^2} \cdot (\nabla\Delta\phi_{ION} + \nabla\Delta N_{ION}) \quad , \quad (3.79)$$

wenn zuvor der Mehrdeutigkeitsterm ermittelt wurde. Dieser ergibt sich aus der Kombination von Phasen- und Streckenmessungen

$$\nabla\Delta N_{ION} = -\nabla\Delta\phi_{L_1} \cdot \lambda_{L_1} + \nabla\Delta\phi_{L_2} \cdot \lambda_{L_2} - \nabla\Delta S_{L_1} + \nabla\Delta S_{L_2} = -\nabla\Delta\phi_{ION} - \nabla\Delta S_{L_1} + \nabla\Delta S_{L_2} \quad , \quad (3.80)$$

wobei der Mittelwert aus diesen Einzelbestimmungen über möglichst lange Zeitintervalle gebildet wird und so der Mehrdeutigkeitsterm als möglichst präzise Fließkommazahl vorliegt. Dieses Vorgehen ist im Nahbereich nicht praktikabel, da die so bestimmten Laufzeitverzögerungen noch im Bereich einiger Dezimeter ungenau sein werden, doch kann ein Einsatz zusammen mit Linearkombinationen wie $L_{5;4}$ oder $L_{4;3}$ erfolgen.

3.4.9.2 Troposphäre und Stratosphäre

Die Refraktion in Troposphäre und Stratosphäre, also dem Gebiet der Neutrosphäre, in dem keine Beeinflussung der Signalausbreitung durch geladene Partikel stattfindet, wird durch den Druck, die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit (bzw. durch den partiellen Wasserdampfdruck) bestimmt. Unterschieden werden die hydrostatische und die feuchte Komponente, wobei der feuchte Anteil maßgeblich durch Temperatur und Feuchte bestimmt wird und sich in den untersten Schichten der Troposphäre konzentriert³⁷. Die hydrostatische Komponente - häufig auch ungenau als »trockener« Anteil bezeichnet - kann unter Annahme eines hydrostatischen Gleichgewichts in Abhängigkeit vom totalen Luftdruck recht genau modelliert werden. Diese Komponente spielt auch in der Stratosphäre eine Rolle, da sie auch in diesen hohen Atmosphärenschichten noch signifikante Größenordnungen von mehreren Zentimetern aufweist.

Die gesamte Laufzeitverzögerung in der Neutrosphäre (Troposphäre und Stratosphäre) von der Bodenantenne A zum Satelliten i kann nach SCHÜLER [2001] durch

$$\begin{aligned} \delta S_{A[NEU]}^i = & m(\epsilon_A^i)_{[H]} \cdot \delta S_{A[H]}^{z=0} + m(\epsilon_A^i)_{[\alpha,H]} \cdot (G_{A[N,H]} \cdot \cos \alpha_A^i + G_{A[O,H]} \cdot \sin \alpha_A^i) \\ & + m(\epsilon_A^i)_{[F]} \cdot \delta S_{A[F]}^{z=0} + m(\epsilon_A^i)_{[\alpha,F]} \cdot (G_{A[N,F]} \cdot \cos \alpha_A^i + G_{A[O,F]} \cdot \sin \alpha_A^i) \end{aligned} \quad (3.81)$$

beschrieben werden. Dabei ist $\delta S_{A[H]}^{z=0}$ die hydrostatische Laufzeitverzögerung ($z=0$: in Zenitrichtung) und $\delta S_{A[F]}^{z=0}$ die feuchte Laufzeitverzögerung. Analog zum Ionosphärenfehler werden die Größen mit Hilfe einer Abbildungsfunktion m (engl. *Mapping Function*) in die Sichtrichtung zum Satelliten in Ab-

Höhe [Km]	Temperatur	Ionisierung	Magnetfeld	Ausbreitung	Technisch
100 000	Thermo- sphäre	Proto- sphäre	Magne- to- sphäre	Iono - sphäre	Obere Atmosphäre
10 000					
1 000		Ionosphäre			
100	Mesosphäre	Neutrosphäre	Dynamo - schicht		Untere Atmosphäre
	Stratosphäre				
10	Troposphäre				

Abbildung 3.18: Einteilung der Atmosphäre unter verschiedenen Ordnungskriterien; aus SEEGER [1989].

Abhängigkeit vom Elevationswinkel ϵ umgerechnet. Weiterhin können azimutale Asymmetrien durch Einführung von Gradienten G in Nord- bzw. Ost-Richtung berücksichtigt werden. Die Gradienten sind zumeist nicht signifikant

$$\delta S_{A[NEU]}^i = m(\epsilon_A^i)_{[H]} \cdot \delta S_{A[H]}^{z=0} + m(\epsilon_A^i)_{[F]} \cdot \delta S_{A[F]}^{z=0} \quad (3.82)$$

und werden deshalb im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt, so dass sich die Gleichung entsprechend reduziert.

3.4.9.2.1 Hydrostatische Laufzeitverzögerung

Aus der Formel für die neutrale Refraktion³⁸

³⁷ Ungefähr die Hälfte des Wasserdampfes kann in den meisten Regionen der Erde in den untersten 1,5 km über der Erdoberfläche gefunden werden, siehe auch SCHÜLER [2001, Kapitel 3].

³⁸ Dabei sind $k_1 = 77,60$ K/hPa, $k_2' = 22,1$ K/hPa und $k_3 = 370100$ K²/hPa die benötigten Refraktionskonstanten, $Z_F \approx 1,0$ die Kompressibilität feuchter Luft, $R_0 = 8,31434$ J/(mol·K) die universelle Gaskonstante, $M_T = 28,9644$ kg/kmol die Molmasse von trockener Luft, $R_T = R_0/M_T$ die spezifische Gaskonstante der trockenen Luft und $\rho =$

$$N = k_1 \cdot \frac{R_0 \cdot \rho}{M_T} + k'_2 \cdot \frac{e}{T} \cdot Z_F^{-1} + k_3 \cdot \frac{e}{T^2} \cdot Z_F^{-1} \quad (3.83)$$

lässt sich der hydrostatische Anteil abspalten und über die Höhe integrieren:

$$\delta S_{A[H]}^{z=0} = 10^{-6} \cdot \int_{h_A}^{\infty} k_1 \cdot \frac{R_0 \cdot \rho}{M_T} \cdot dh = 10^{-6} \cdot k_1 \cdot R_T \cdot \int_{h_A}^{\infty} \rho \cdot dh \quad (3.84)$$

Die Auswertung des Integrals ist in der Praxis nicht notwendig, da unter der Annahme eines hydrostatischen Gleichgewichts die Kenntnis des Bodendrucks genügt, um die hydrostatische Laufzeitverzögerung zu ermitteln. Hier wird das Modell von SAASTAMOINEN [1972] benutzt³⁹:

$$\delta S_{A[H]}^{z=0} = \frac{0,0022767 \left[\frac{m}{hPa} \right] \cdot p_A}{1 - 0,00266 \cdot \cos 2\varphi_A - 0,00028 \left[\frac{1}{km} \right] \cdot h_A} \quad (3.85)$$

Im Wesentlichen genügt der totale Luftdruck⁴⁰ zur Berechnung. Der Nenner berücksichtigt die Schwereabnahme zu den Polen hin als Funktion der geografischen Breite der Antenne A und ihrer ellipsoidischen Höhe h .

3.4.9.2.2 Feuchte Laufzeitverzögerung

Während der hydrostatische Term bei Kenntnis des Luftdrucks auf wenige Millimeter bestimmt werden kann, bereitet die Approximation des Integrals für die feuchte Komponente

$$\delta S_{A[F]}^{z=0} = 10^{-6} \cdot \int_{h_A}^{\infty} \left(k'_2 \cdot \frac{e}{T} + k_3 \cdot \frac{e}{T^2} \right) \cdot Z_F^{-1} \cdot dh \quad (3.86)$$

große Probleme, da die Verteilung des Wasserdampfes, der den Wasserdampfdruck induziert, recht inhomogen in der Atmosphäre ist und mit Bodenmodellen nur ungenau präzisiert werden kann. In Abschnitt 3.4.9.2.5 wird - nach der Behandlung des stochastischen Verhaltens der beiden Komponenten - auf die Problematik der funktionalen Modellierung weiter eingegangen.

3.4.9.2.3 Abspaltung des deterministischen Anteils

Der deterministische Anteil der troposphärischen Laufzeitverzögerung kann mit Modellen ermittelt werden, die sich klimatologischer Parameter bedienen und gelegentlich auch als »blinde« oder »harmonische« Modellansätze bezeichnet werden. Derartige Ansätze werden in der Praxis verwendet, denn sie bieten die Möglichkeit, troposphärische Laufzeitverzögerungen ohne jegliche Kenntnis meteorologischer Eingangsgrößen zu berechnen. Dazu werden - analog zum Vorgehen bei der Ionosphäre in diesem Kapitel - Mittelwerte, saisonale Schwankungen und ggf. auch tägliche Variationen der benötigten Größen verwendet.

Ein sehr einfaches Modell dieser Bauart stellt das MOPS-RTCA Troposphärenmodell dar⁴¹, bei dem lediglich in Abhängigkeit von der geografischen Breite mit einer Auflösung von 15° die klimatologischen Parameter linear interpoliert werden.

$\rho_T + \rho_F$ die Dichte der Luft (Summe der Dichte von trockener und feuchter Luft) sowie T die Temperatur und e der partielle Wasserdampfdruck.

³⁹ Eine Herleitung des Modells findet sich bei SCHÜLER [2001, Abschnitt 3.2.2.1.2].

⁴⁰ Also die Summe aus dem Druck der trockenen Luft und dem partiellen Wasserdampfdruck (feucht).

⁴¹ siehe MOPS [1996] und SCHÜLER [2001, Abschnitte 3.2.2.1.3 und 3.2.2.2.4]

GTN (Global Tropospheric Navigation) Model

In SCHÜLER, HEIN, EISSFELLER [2001a] wird mit dem GTN-Modell (*Global Tropospheric Navigation Model*) ein ähnlicher Ansatz verfolgt, allerdings erfolgt die Modellbildung nun in Breiten- und Längenrichtung mit einer Auflösung von $1^\circ \times 1^\circ$ bzw. in der Variante mit reduzierter Auflösung mit 15° (N/S) \times 30° (W/O). Als Datenbasis wird ein globales numerisches Wettermodell (NWM) der Auflösung T170L42 genutzt⁴². Zur Berechnung des hydrostatischen Anteils wird das bereits eingeführte SAASTAMOINEN-Modell verwendet, die feuchte Komponente der troposphärischen Laufzeitverzögerung wird direkt dargestellt

$$\delta S_{[F]}^{z=0} = \delta \bar{S}_{[F]}^{z=0} + \delta \tilde{S}_{[F]}^{z=0} \cdot \cos \left(2\pi \cdot \frac{t_D - \Delta t_W}{365,25 [d]} \right) \quad , \quad (3.87)$$

wobei saisonale Variationen über eine Cosinus-Funktion mit der Phasenverschiebung Δt_W (Tag des »maximalen Winters«) berücksichtigt werden⁴³. In gleicher Weise wird bzgl. des Luftdrucks vorgegangen, der als Eingabeparameter für das hydrostatische Modell benötigt wird. In Höhenrichtung erfolgt die Reduktion des Luftdrucks über die Formel

$$p_i = a_p \cdot \Delta H_i + b_p \cdot \Delta H_i^2 + p_o \cdot \exp(c_p \cdot \Delta H_i) \quad \wedge \quad \Delta H_i = H_o - H_i \quad (3.88)$$

mit H_o als geopotentielle (dynamische) Referenzhöhe und p_o als Luftdruck bei der Referenzhöhe sowie H_i als Höhe des Punktes i . Die Koeffizienten a_p , b_p und c_p des Druckprofils werden dabei vom Modell für jeden Gitterpunkt angegeben. Diese Darstellung lehnt sich eng an die zweidimensionale troposphärische Datenrepräsentation TROPEX an⁴⁴, wobei die linearen und parabolischen Koeffizienten a_p und b_p aber grundsätzlich bei dem GTN Trendmodell vernachlässigt werden können, d.h. grundsätzlich lässt sich die Höhenreduktion wie für die feuchte Laufzeitverzögerung

$$\delta S_{[F]i}^{z=0} = \delta S_{[F]o}^{z=0} \cdot \exp \left(-\frac{H_i - H_o}{q_F} \right) \quad (3.89)$$

als Exponentialfunktion mit q_F als Skalierungshöhe der feuchten Komponente beschreiben.

TropSite/TropGrid für das ESA Galileo-Testbed V1

KRUEGER, SCHÜLER, HEIN, MARTELLUCCI, BLARZINO [2004] haben als Grundlage für das zukünftige Standard-Korrekturmodell des europäischen Satellitennavigationssystems Galileo im Rahmen des ESA GSTB-V1 einen stationsspezifischen und einen gitterförmigen Korrekturansatz entwickelt, der sich in den Grundsätzen zwar am GTN-Modell orientiert, jedoch eine deutlich kompliziertere Struktur aufweist und weitgehend physikalischen und weniger empirischen Grundsätzen entspringt. Bzgl. der hydrostatischen Komponente wird ebenfalls durch dieses Modell der Luftdruck bereitgestellt,

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \cdot \cos \left(2\pi \cdot \frac{t_D - \Delta t_W}{365,25 [d]} \right) \quad (3.90)$$

der Eingang in das SAASTAMOINEN-Modell findet. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass der Wert für Δt_W nun nicht mehr fixiert wird, sondern individuell für jeden Gitterpunkt bestimmt und

⁴² Die horizontale Auflösung entspricht einer Kugelfunktionsentwicklung bis zu Grad und Ordnung 170, in vertikaler Richtung werden 42 Luftdruckschichten verwendet. Die für den Nutzer daraus erzeugten Ausgabedateien beziehen sich dann bereits auf ein $1^\circ \times 1^\circ$ Gitter mit 26 Vertikalschichten für Höhe und Temperatur, sowie 21 Schichten für die relative Luftfeuchtigkeit.

⁴³ t_D : Zeitpunkt als »Tag des Jahres« (*»Day of Year«, DoY*) mit dem Wert 1,0 für den 1. Januar um 0:00 h; Δt_W hat beim GTN-Modell den Wert 28 d für die Nordhemisphäre und 211 d für die Südhalbkugel

⁴⁴ siehe SCHÜLER, HEIN, EISSFELLER [2000a] und SCHÜLER [2001]

neben dem Mittelwert \bar{p} und der Amplitude \tilde{p} über das Modell dem Nutzer zur Verfügung gestellt wird. Die feuchte Komponente berechnet sich nach physikalischen Grundsätzen über

$$\delta S_{[F]}^{z=0} = 10^{-6} \cdot \frac{k_3}{T_M} \cdot \frac{R_T}{g_m} \cdot \frac{e}{\lambda + 1} \quad , \quad (3.91)$$

wobei eine Abnahme des partiellen Wasserdampfdrucks e gemäß des Zusammenhangs

$$\frac{e}{e_0} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\lambda+1} \quad , \quad (3.92)$$

angenommen und mit dem Koeffizienten λ (*»Water Vapour Lapse Rate«*) beschrieben wird⁴⁵. Die effektive Schwerebeschleunigung ergibt sich zu

$$g_m = 9,784 [m \cdot s^{-2}] \cdot (1 - 0,00266 \cdot \cos 2\varphi - 0,00028 [km^{-1}] \cdot h) \quad . \quad (3.93)$$

Die zum Wasserdampfdruck gewichtete mittlere Temperatur T_M , die trockene Temperatur T sowie der Wasserdampfdruck e werden zusätzlich unter Einschluss von täglichen Variationen modelliert

$$T_M = a + b \cdot \cos \left(2\pi \cdot \frac{t_H - \Delta t_D}{24 [h]} \right) \quad , \quad (3.94)$$

mit

$$\begin{aligned} \Delta t_D &= \bar{\Delta t}_D + \tilde{\Delta t}_D \cdot \cos \left(2\pi \cdot \frac{t_D - \Delta t_W}{365,25 [d]} \right) \quad \text{sowie} \\ a &= \bar{a} + \tilde{a} \cdot \cos \left(2\pi \cdot \frac{t_D - \Delta t_W}{365,25 [d]} \right) \quad \wedge \quad b = \bar{b} + \tilde{b} \cdot \cos \left(2\pi \cdot \frac{t_D - \Delta t_W}{365,25 [d]} \right) \end{aligned} \quad (3.95)$$

Die Amplitude b darf im Laufe eines Jahres saisonal schwanken, ebenso wie der Modellkoeffizient a . Die jeweiligen Teilmittelwerte \bar{a}, \bar{b} und Teilamplituden \tilde{a}, \tilde{b} sowie Δt_W werden für jeden Gitterpunkt individuell bestimmt. Auch die Phasenverschiebung Δt_D wird als periodische Funktion mit zu schätzendem $\bar{\Delta t}_D$ und $\tilde{\Delta t}_D$ definiert, kann bei mangelnder Signifikanz am entsprechenden Gitterpunkt aber auch durch eine zeitlich invariable Konstante ersetzt werden.

Die Höhenreduktion für die trockene und mittlere Temperatur erfolgt dabei bis zur Höhe der Tropopause über die bekannte lineare Abnahmefunktion

$$T(h)_M = T(h_0)_M + \beta_{TM} \cdot (h - h_0) \quad (3.96)$$

mit β_{TM} als Abnahmegradiant und für den totalen Luftdruck mit Hilfe von

$$\frac{p(h)}{p(h_0)} = \left[\frac{T(h)}{T(h_0)} \right]^{-\frac{g}{R_d \cdot \beta_T}} = \left[1 + \frac{\beta_T \cdot (h - h_0)}{T(h_0)} \right]^{-\frac{g}{R_d \cdot \beta_T}} \quad , \quad (3.97)$$

so dass zu einer beliebigen Höhe h die Laufzeitverzögerungen ermittelt werden können^{46;47}. Dabei ist β_T der lineare Abnahmegradiant der trockenen Temperatur (nicht identisch mit β_{TM}) und g die Normalschwere in Abhängigkeit von der Breite φ und ellipsoidischen Höhe h des Punktes.

⁴⁵ Dabei sind p_0, e_0 der totale Luftdruck bzw. partielle Wasserdampfdruck auf der Referenzhöhe (im Normalfall der Modelloberfläche) und g_m ist die mittlere Schwerebeschleunigung.

Der Unterschied zwischen »TropSite« und »TropGrid« besteht im Wesentlichen in der Verwendung eines regelmäßigen $1^\circ \times 1^\circ$ Gitters im Falle von TropGrid, wohingegen bei TropSite stationsspezifische Modellparameter für eine Vielzahl von Stationen des IGS und EUREF Netzwerkes, verschiedene EGNOS Bodenstationen sowie Orte geplanter GSTB oder Galileo Stationen bestimmt wurden. Weiterhin wird bei TropSite der partielle Wasserdampfdruck aus der Temperatur und der relativen Luftfeuchte berechnet, während bei TropGrid der partielle Wasserdampfdruck unmittelbar auf dem Modellgitter gegeben wird.

3.4.9.2.4 Bestimmung des stochastischen Verhaltens

Analog zum Vorgehen bzgl. der Ionosphäre werden aus den residuellen troposphärischen Laufzeitverzögerungen, die nach Subtraktion des Trendmodells verbleiben, die Kreuz-Korrelationen bestimmt, um einen Zusammenhang zwischen der räumlichen Dekorrelation der Größen und der Entfernung zwischen zwei Stationen zu untersuchen und eine Korrelationsfunktion aufzustellen. Als Datenbasis werden die auch im Rahmen der Arbeiten für das GSTB-V1 benutzten Stationsdatensätze für die IGS, EUREF, EGNOS und GSTB Stationen verwendet. Als Trendfunktion wird der TropSite-Ansatz verwendet. Im Gegensatz zur Ionosphäre genügt nun jedoch eine rein horizontale Betrachtung nicht mehr aus. Vielmehr wird eine Aufspaltung in horizontaler und radialer Richtung vorgenommen, da eine deutliche Dekorrelation mit abnehmender Höhe festgestellt werden kann.

Horizontale Korrelation

Die stochastische Modellierung bezieht sich bzgl. der hydrostatischen Komponente auf den Luftdruck p , bzgl. der feuchten Komponente unmittelbar auf die Laufzeitverzögerung. Abbildung 3.19 und Abbildung 3.20 zeigen jeweils die ermittelten Korrelationen zwischen zwei Stationen und die gefundene mittlere Korrelationsfunktion. Das stochastische Verhalten des Luftdrucks erlaubt eine geschlossene Darstellung der Form

$$\rho(\Delta s)_{p \leftrightarrow} = \exp \left[-0,4686 \cdot \left(\frac{\Delta s}{1000 [km]} \right)^2 \right] \quad (3.98)$$

und für die feuchte Komponente erfolgt die stückweise Modellierung zunächst in Form einer Parabel

$$\rho(\Delta s)_{F \leftrightarrow} = \begin{cases} 1,0 & \text{für } \Delta s = 0 \\ 0,3415 \cdot \left(\frac{\Delta s}{1000 [km]} - 1,711215 \right)^2 & \text{für } 0 < \Delta s \leq 1711 \text{ km} \\ 0,0 & \text{für } \Delta s > 1711 \text{ km} \end{cases} \quad (3.99)$$

bis zur Entfernung von etwa 1700 km, die von einer Nullgeraden gefolgt wird. Für beide Komponenten der Laufzeitverzögerung in der Neutrosphäre fällt die deutlich geringere horizontale Korrelation im Vergleich zur Laufzeitverzögerung in der Ionosphäre auf⁴⁶. Der Luftdruck wiederum dekorreliert mit zunehmender Entfernung nur etwa halb so schnell wie die feuchte Komponente der Laufzeitverzögerung.

⁴⁶ Eine beliebige Höhe innerhalb des Definitionsbereichs des Modells, der sich von der Modelloberfläche bis zur Höhe der Tropopause erstreckt (ca. 15 km Höhe).

⁴⁷ Im Gegensatz zum GTN-Modell werden bei TropGrid und TropSite im Sinne der Benutzerfreundlichkeit ellipsoidische Höhen verwendet, die bei Bedarf über das Geoidmodell (EGM96) in am Schwerfeld orientierte Höhen umgewandelt werden.

⁴⁸ Allerdings führt auf Grund der wesentlich höheren Lage der Ionosphärenschichten die Problematik der Sub-Ionosphärenpunkte IP zu stärkeren Entfernungsdifferenzen in Abhängigkeit von Elevation und Azimut, so dass der Ionosphärenfehler sich in den doppelten Differenzen schneller negativ bemerkbar machen kann.

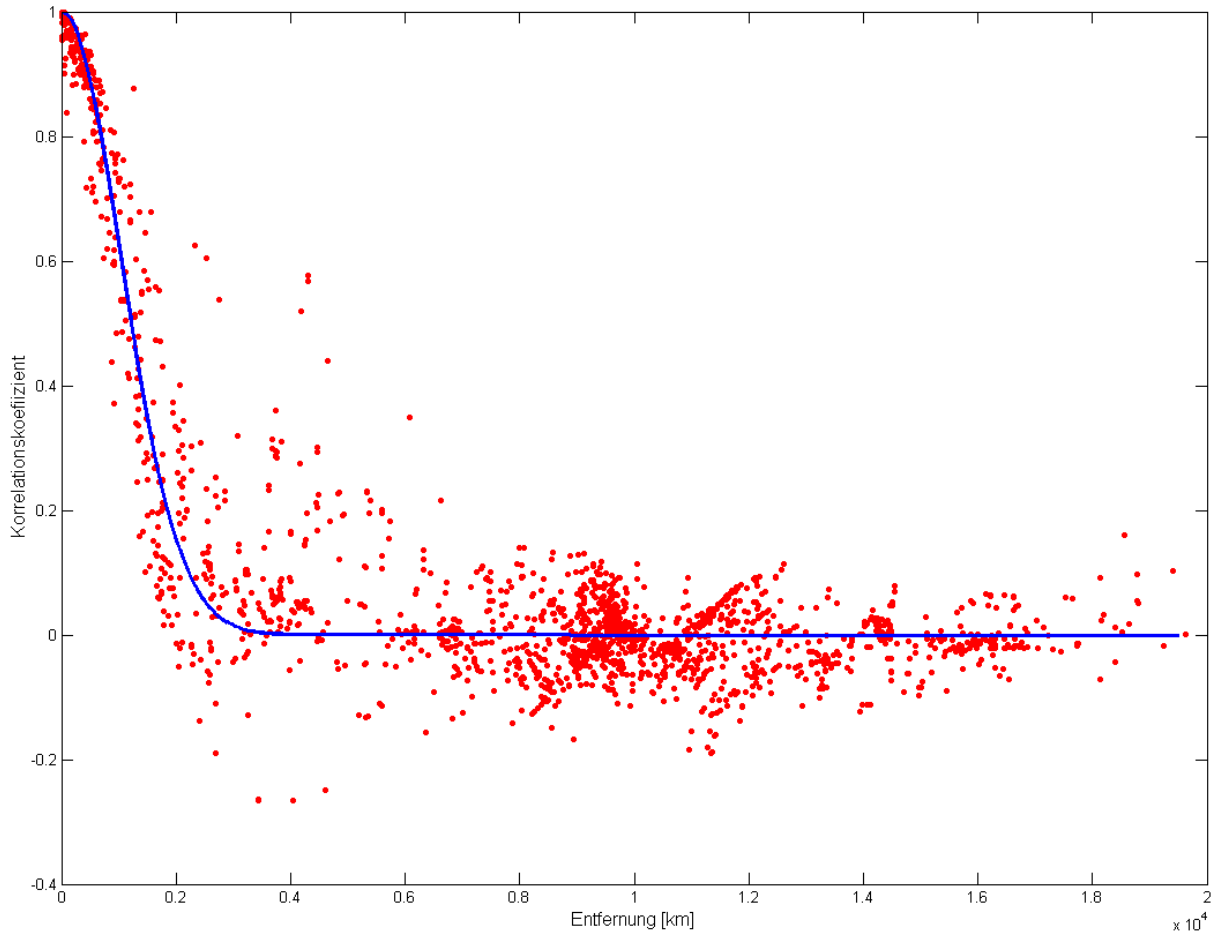


Abbildung 3.19: Bestimmte Kreuz-Korrelationen für den Luftdruck zwischen den einzelnen IGS-Stationen in Abhängigkeit von der horizontalen Distanz und ausgleichende Korrelationsfunktion.

Radiale Korrelation

Die troposphärische Laufzeitverzögerung nimmt mit der Höhe gewöhnlich ab, d.h. es kommt zu einer Dekorrelation der Größen mit zunehmendem Höhenunterschied. Zur Beschreibung dieses im Wesentlichen auf funktionaler Korrelation beruhenden Verhaltens werden an dieser Stelle Daten aus Radiosonden-Aufstiegen genutzt, die an 8 global verteilten Stationen gesammelt wurden, 4 davon im europäischen Raum. Der Vorteil der Radiosonden-Profile im Vergleich zum hier genutzten numerischen Wettermodell liegt in der deutlich höheren vertikalen Auflösung.

Abbildung 3.21 zeigt die ermittelten empirischen Auto-Korrelationsfunktionen (blau) für ausgewählte Radiosonden-Stationen. In roter Farbe wurde der Verlauf der mittleren, globalen Auto-Korrelationsfunktion und in grün jene über die europäischen Stationen abgeleitete Funktion eingezeichnet. Die Verläufe der empirischen Funktionen zeigen teilweise deutliche Unterschiede, so dass zumindest eine Konkretisierung für den europäischen Raum als notwendig erachtet wurde. Für die globale Komponente folgt

$$\rho(\Delta h)_{p\uparrow} = \exp \left[-0,0813 \cdot \left(\frac{\Delta h}{1000 [m]} \right)^2 \right], \quad (3.100)$$

während für die europäischen Stationen

$$\rho(\Delta h)_{p\uparrow} = 0,0025 \cdot \left[\frac{|\Delta h|}{1000 [m]} - 20 \right]^2 \quad (3.101)$$

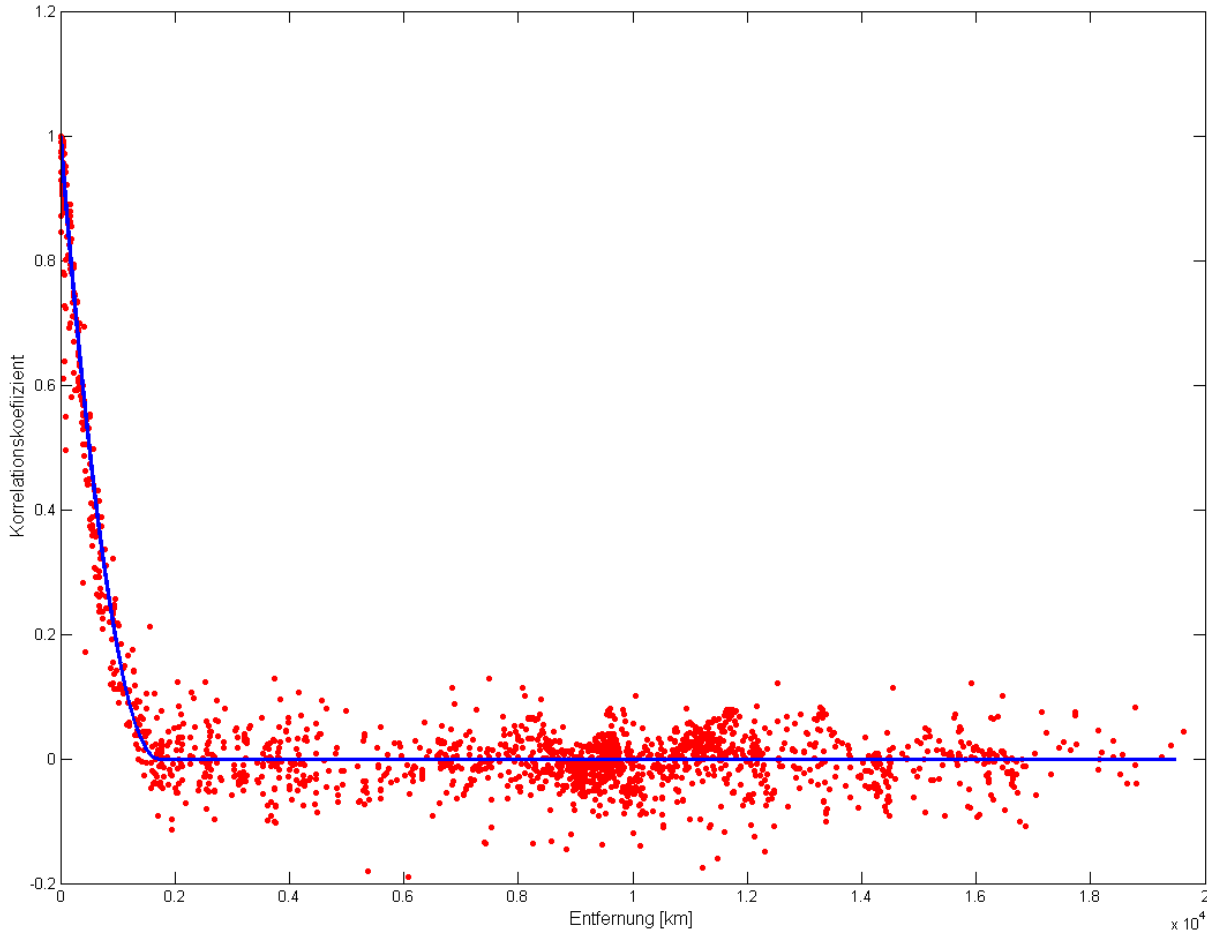


Abbildung 3.20: Bestimmte Kreuz-Korrelationen für die feuchte Laufzeitverzögerung zwischen den einzelnen IGS-Stationen in Abhängigkeit von der horizontalen Distanz und ausgleichende Korrelationsfunktionen.

eine bessere Übereinstimmung mit den empirisch ermittelten Korrelationskoeffizienten ermöglicht wird. Die feuchte Laufzeitverzögerung erlaubt innerhalb akzeptabler Grenzen eine einheitliche Beschreibung mit Hilfe der Formel

$$\rho(\Delta h)_{F\uparrow} = \exp \left[-0,0134 \cdot \left(\frac{\Delta h}{1000 [m]} \right)^2 \right] \quad (3.102)$$

mit einer Abnahmerate, die ungefähr um den Faktor 6 von jenem für den Luftdruck (hydrostatische Komponente) abweicht. Abbildung 3.22 veranschaulicht die empirischen und die modellierten (mittlere, globale) Auto-Korrelationsfunktionen.

Stochastisches Modell

Der resultierende Korrelationskoeffizient, der sowohl die horizontale als auch die radiale Dekorrelation der troposphärischen Laufzeitverzögerungen zwischen zwei Punkten A und B beschreibt, wird durch Multiplikation

$$\begin{aligned} \rho_{AB[P]} &= \rho(\Delta s_{AB})_{AB[P\leftrightarrow]} \cdot \rho(\Delta h_{AB})_{AB[P\uparrow]} \\ \rho_{AB[F]} &= \rho(\Delta s_{AB})_{AB[F\leftrightarrow]} \cdot \rho(\Delta h_{AB})_{AB[F\uparrow]} \end{aligned} \quad (3.103)$$

wie bei SCHWIEGER [1999] ermittelt und erlaubt nun die Aufstellung der Kovarianzmatrizen in ähnlicher Weise wie es in Abschnitt 3.4.9.1.2 für die Ionosphäre bereits exerziert wurde. Die

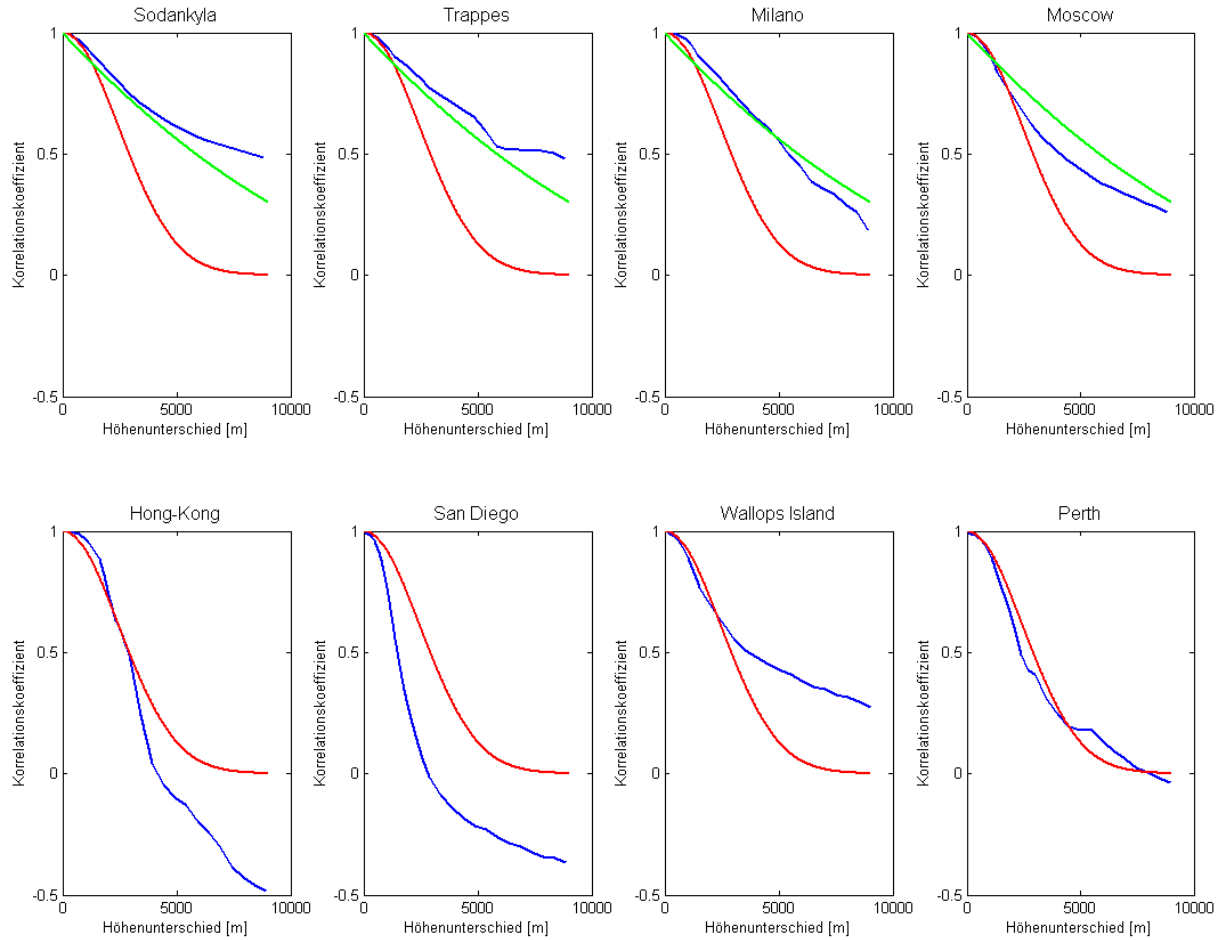


Abbildung 3.21: Auto-Korrelationsfunktionen zur Beschreibung der vertikalen Dekorrelation des Luftdrucks als Funktion des Höhenunterschieds für 8 ausgewählte Radiosonden-Stationen (blau: empirische Auto-Korrelationsfunktion; rot: globale Modell-Funktion; grün: europäische Modellfunktion).

Kovarianzmatrix im Beobachtungsraum der doppelten Differenzen für die neutrale Laufzeitverzögerung folgt dann mit

$$\underline{\Sigma}_{\nabla\Delta\phi[NEU]} = \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta\phi[H]} + \underline{\Sigma}_{\nabla\Delta\phi[F]} = \underline{F}_H \cdot \underline{\Sigma}_{pp} \cdot \underline{F}_H^T + \underline{F}_F \cdot \underline{\Sigma}_{FF} \cdot \underline{F}_F^T, \quad (3.104)$$

wobei $\underline{\Sigma}_{pp}$ die Kovarianzmatrix der Luftdruckwerte darstellt und \underline{F}_H den funktionalen Zusammenhang zwischen der hydrostatischen Laufzeitverzögerung in den doppelten Differenzen unter Nutzung des SAASTAMOINEN-Modells und dem Luftdruck herstellt. $\underline{\Sigma}_{FF}$ ist dann die Kovarianzmatrix der feuchten Laufzeitverzögerungen in Zenitrichtung und \underline{F}_F stellt die zugehörige Funktionalmatrix dar.

3.4.9.2.5 Systematische Fehlerwirkung

Auch die verbleibenden troposphärischen Laufzeitfehler werden über kürzere Messzeiträume deutliche systematische Signaturen und weniger zufälligen Charakter zeigen. Diese Tatsache verdeutlicht Abbildung 3.23 in den drei Koordinatendimensionen für einen 24 h umfassenden Datensatz der Referenzstation IF1A. Die Darstellungen zeigen den Positionsfehler bei einer Einzelstationspositionierung (*keine* Doppeldifferenzen), der durch die Vernachlässigung des Troposphärenfehlers (Gesamteffekt) entstehen würde. Die Kurzzeitsystematiken treten sehr deutlich hervor, auch zeigt sich die bevorzugte Wirkrichtung im Höhenkanal. Die Systematiken können grundsätzlich mit bestimmten Satellitengeometrien in Verbindung gebracht werden.

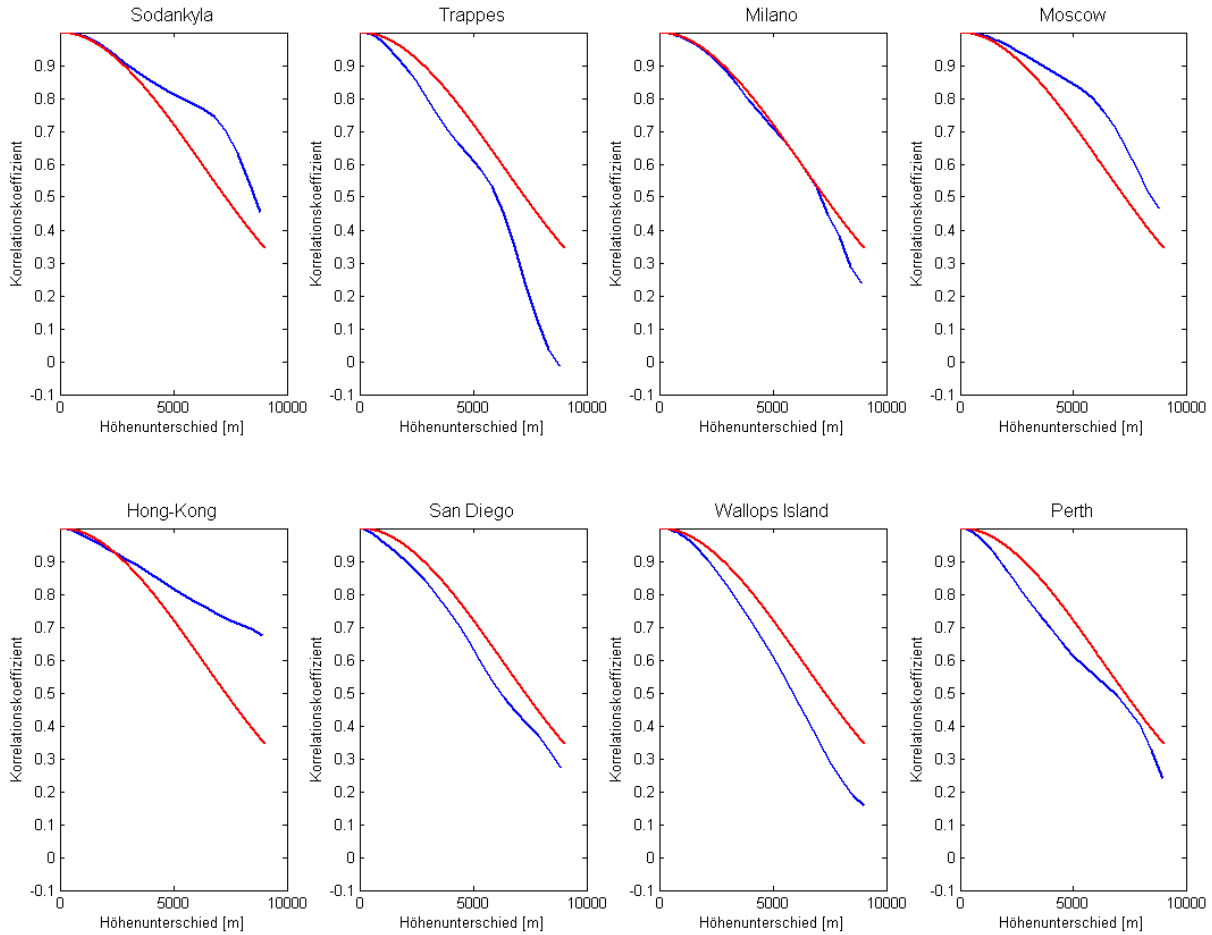


Abbildung 3.22: Auto-Korrelationsfunktionen zur Beschreibung der vertikalen Dekorrelation der feuchten troposphärischen Laufzeitverzögerung als Funktion des Höhenunterschieds (blau: empirische Auto-Korrelationsfunktion; rot: globale Modell-Funktion).

Aus diesem Grunde wird auch eine systematische Fehlerfortpflanzung für die beiden Troposphärenkomponenten

$$I_{\Delta[H]} = \underline{F}_H \cdot \underline{\Delta}_P \quad \wedge \quad I_{\Delta[F]} = \underline{F}_F \cdot \underline{\Delta}_F, \quad (3.105)$$

betrieben, so dass nach der Umrechnung mit Hilfe der \underline{F} -Matrix die systematischen Fehlerwirkungen der residuellen Troposphärenfehler auf die doppelten Differenzen in Form der Vektoren $I_{\Delta[H/F]}$ vorliegen.

3.4.9.2.6 Aspekte der funktionalen Modellierung

Neben der Aufstellung eines stochastischen und ggf. auch systematischen Fehlermodells sollen abschließend noch einige Anmerkungen zur funktionalen Modellbildung im Hinblick auf die Troposphäre gemacht werden, die den aktuellen Stand der Möglichkeiten widerspiegeln.

Modelle

Generell können unter dem Gesichtspunkt der erzielbaren Genauigkeit für die Troposphärenfehler vier verschiedene Ansätze unterschieden werden (Genauigkeitsangaben werden als Standardabweichung s_e gemacht):

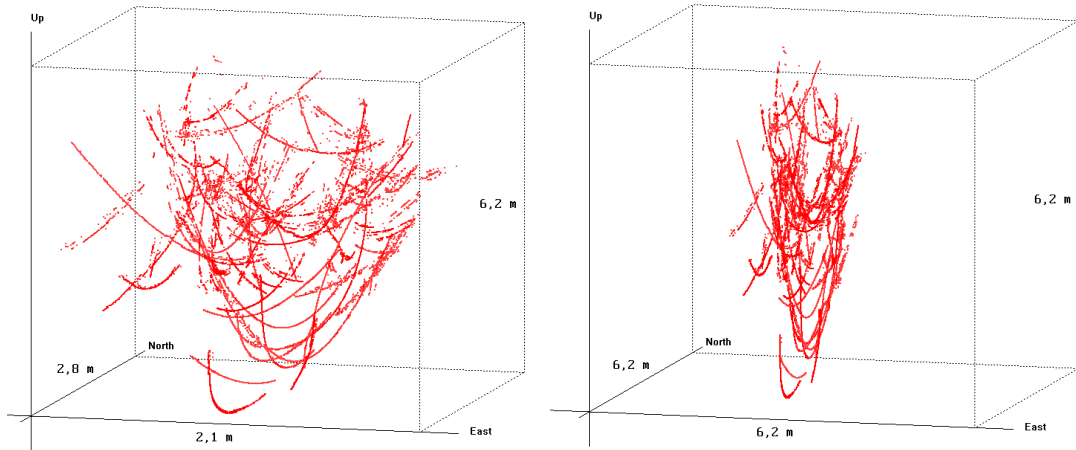


Abbildung 3.23: Perspektivdarstellung der durch Vernachlässigung der Laufzeitverzögerungen in der Neutrosphäre entstehenden Positionsfehler. Die linke Darstellung nutzt unterschiedliche Achsenmaßstäbe um die systematischen Signaturen herauszuarbeiten. Die rechte Darstellung zeigt die bevorzugte Wirkrichtung im radialen Koordinatenkanal durch Gleichskalierung. (GPS-Datensatz von der Referenzstation IF1A über 24 h, Institut für Erdmessung und Navigation, 18. Juni 2004)

- a) Modelle ohne meteorologische Messdaten erlauben im Allgemeinen die Bestimmung dieser Laufzeitverzögerungen auf globaler Skala. Die bisher vorgestellten Ansätze wie MOPS-RTCA, GTN und TropGrid, TropSite gehören zu dieser Gruppe. Die Modellfunktionen erlauben dabei in den meisten Fällen auch die Verarbeitung von Oberflächenmessungen, doch werden diese im »Normalbetrieb« über harmonische (»blinde«) Funktionen, die saisonale und teilweise auch tägliche Mittelwertschwankungen berücksichtigen, bereitgestellt. Im Rahmen der GSTB-Aktivitäten konnte von KRUEGER, SCHÜLER, HEIN u.a. [2004] eine Genauigkeit für MOPS-RTCA von ungefähr 5,4 cm in Zenitrichtung und für TropGrid bzw. TropSite von 3,8 cm ermittelt werden; die Standardabweichung für TropSite liegt dabei geringfügig - im Schnitt um knapp 1 mm - unter jener von TropGrid, was mit den zusätzlichen Interpolationsfehlern bei TropGrid begründet werden kann. SCHÜLER, HEIN, EISSFELLER [2001a] bescheinigen dem GTN-Modell mit $1^\circ \times 1^\circ$ Auflösung eine Genauigkeit von 4,0 cm und in der $15^\circ \times 30^\circ$ Variante von 4,5 cm. Das ebenfalls überprüfte MOPS-RTCA-Modell schneidet bei dieser Studie mit 5,1 cm um 28% bzw. 13% schlechter ab.
- b) An Stelle der blinden Modelle können die tatsächlichen Oberflächenmessungen für Druck, Temperatur und Luftfeuchtigkeit Eingang in die Modellfunktionen finden. Auf diese Weise lässt sich die hydrostatische Komponente sehr genau bestimmen, doch bleibt bei der feuchten Komponente der Genauigkeitsgewinn beschränkt. In KRUEGER, SCHÜLER, HEIN u.a. [2004] wird im Rahmen der TropSite-Bemühungen ein empirisches Modell präsentiert

$$\delta S_{[F]}^{z=0} = k_1 + k_2 \cdot (p_0 - 1000 [hPa]) + k_3 \cdot (T_0 - 273,15 [K]) + k_4 \cdot e_0 + k_5 \cdot \frac{e_0}{T_0} \quad , \quad (3.106)$$

das sich an die Entwicklungen von IFADIS [1986] anlehnt. Dabei wurden für alle in die Modellierung aufgenommenen Stationen spezifische Koeffizienten $k_{1..5}$ berechnet, die wiederum auch saisonale Schwankungen einschließen, also analog zu Formel 3.94 zusammengesetzt sind. Bei Benutzung der meteorologischen Eingangsgrößen bezogen auf den Antennenstandort (p_0 , T_0 , e_0) wird eine Standardabweichung von 2,5 cm festgestellt, was um mehr als 1 cm besser als im Fall der »blinden« Modelle ist. Dennoch ist die Verwendung von meteorologischen Messungen grundsätzlich nur in eingeschränktem Maße ratsam und sollte auf die hydrostatische Komponente beschränkt bleiben. Eigene Erfahrungen haben gezeigt, dass insbes. die Ermittlung eines repräsentativen Wertes für den partiellen Wasserdampfdruck teilweise nicht unkritisch ist und im kinematischen Betrieb noch zunimmt. Die Datenqualität einer Reihe von meteorologischen Sensoren auf IGS-Stationen darf als zweifelhaft bewertet werden. Weiterhin zeigen sich natür-

liche Phänomene, die zu deutlichen Unsicherheiten führen, beispielsweise die häufig um die Mittagsstunden auftretenden Szintillationen in der Temperatur während der Sommermonate, die eine Tiefpassfilterung der berechneten feuchten Verzögerungen (oder der Eingangsgrößen) erforderlich machen. Da die nachfolgend beschriebene Methode eindeutig genauere (und zuverlässigere) Werte liefert, wird dem hier beschriebenen Ansatz keine Bedeutung mehr eingeräumt, und er wurde für die hier dargestellten Arbeiten auch nicht verwendet.

- c) Numerische Wetterfelder erlauben - ebenso wie Radiosonden-Aufstiege - die numerische Auswertung der Integralformel 3.86, da sich aus ihnen das Refraktionsprofil über einer Station extrahieren lässt. Bereits globale Felder mit $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ Auflösung erlauben die Berechnung feuchter Laufzeitverzögerungen mit einer Genauigkeit, die grundsätzlich über jener der Methoden (a) und auch (b) liegen. SCHÜLER, HEIN, EISSFELLER [2001b] demonstrieren die Leistungsfähigkeit des bereits erwähnten globalen $1^\circ \times 1^\circ$ Wettermodells und geben die Genauigkeit der feuchten Komponente in Zenitrichtung im Mittel über alle verwendeten Netzkpunkte mit 1,4 cm an. Die Standardabweichung der totalen (gesamten) Laufzeitverzögerung wird von KRUEGER, SCHÜLER, HEIN u.a. [2004] mit 1,6 bis 1,4 cm angegeben, wobei sich eine Steigerungstendenz zwischen den Jahren 1999 bis 2002 erkennen lässt, die aber nicht zweifelsfrei auf Verbesserungen im Wettermodell zurückgeführt werden, sondern eher durch Einbeziehung weiterer GPS-Troposphären Daten für zusätzliche Stationen begründet werden kann, insbes. durch Hinzunahme der EUREF-Ergebnisse, die sich innerhalb Europas konzentrieren. Die in SCHÜLER [2000, 2001] verwendete TROPEX-Datenrepräsentation (zweidimensional mit Höhenreduktionsmodell wie bei GTN) nutzt die Daten der dreidimensionalen Wettermodelle.
- d) Die Mitschätzung der (residuellen) troposphärischen Laufzeitverzögerung als zusätzliche Unbekannte verbleibt als letzte Möglichkeit⁴⁹. Diese Methode hat sich überall dort bewährt, wo die Bewegungsraten der Punkte so gering sind, dass über eingeschränkte Zeiträume das Auswerteverfahren auf statischen Grundsätzen basieren kann⁵⁰. Sie erlaubt auch die Ableitung des integrierten Wasserdampfgehalts, der für Meteorologie und Klimaforschung von Bedeutung ist. In Kapitel 7 wird gezeigt, dass dieser Ansatz auch auf bewegten Plattformen einsetzbar ist. Eine generelle Mitschätzung wird indes nicht empfohlen, wenn die Positionsgenauigkeit im Vordergrund steht, da zusätzliche Korrelationen in radialer Richtung auftreten, die nicht zwingend zu einer Genauigkeitssteigerung führen müssen.

Im Nahbereich kann problemlos der Einsatz von Methode (a) erfolgen, da verbleibende Restfehler sehr hoch miteinander korreliert sind und in den doppelten Differenzen nahezu eliminiert werden⁵¹. Auch die Verwendung der numerischen Wetterfelder (c) kann erfolgen⁵², während Methode (b) nicht empfohlen wird, da die Messfehler in den meteorologischen Oberflächengrößen, insbesondere bei Temperatur und Luftfeuchtigkeit zusätzliche Fehler mit anderem stochastischen Verhalten induziert, was schnell zur Dekorrelation der Troposphärenfehler führt. Überschreitet die Basislinienlänge Beträge von wenigen Zehnerkilometern, so wird die Verwendung der Wettermodelle (c) grundsätzlich empfohlen. Im Fernbereich kann die Mitschätzung (d) verwendet werden, sie kann sich für kinematische Träger aber als problematisch erweisen und sollte auf quasi-statische Szenarien beschränkt bleiben. Eine Kombination von (c) - für den Rover - und (d) - für die Referenzstationen - ist bei großen Basislinien-Längen hingegen denkbar.

⁴⁹ Die Nutzung von Radiosonden-Profilen oder auch von Wasserdampf-Radiometer-Ergebnissen wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt, da sie für die kinematische Positionierung entweder nicht wirtschaftlich erscheint oder nur schwierig einsetzbar ist.

⁵⁰ Das Analyseintervall überschreitet im Allgemeinen 24 Stunden nicht, da in diesem Rhythmus die Daten vieler Netzwerke zur Verfügung gestellt werden. Die Koordinaten von Referenzstationen können für diesen Zeitraum beispielsweise in guter Näherung als konstant angesehen werden.

⁵¹ Unsicherheiten können sich nur dann ergeben, wenn die Punkte auf deutlich unterschiedlichen Höhen liegen, denn in diesem Fall kann die vom Troposphärenmodell durchzuführende Höhenreduktion zu einer erhöhten Standardabweichung führen. Der Begriff »Nahbereich« definiert sich also sowohl mit Bezug auf die horizontale Distanz als auch unter Berücksichtigung des bestehenden Höhenunterschiedes.

⁵² Der erhöhte Aufwand steht allerdings nicht unbedingt im Einklang mit dem Nutzen, wenngleich durch den Einsatz der Wettermodelle grundsätzlich nicht mit einer Verschlechterung des Fehlerbudgets zu rechnen ist, was bei Methode (b) unter Umständen der Fall wäre.

Dislokations-Korrektur

Bei den Ansätzen (a) und (c) werden gitterförmig angeordnete Troposphären-Informationen bereitgestellt. Die Koordinaten des Punktes, für den die Daten zu interpolieren sind, ergibt sich in erster Näherung aus den Koordinaten der GPS-Antenne. Im Sinne der Berücksichtigung räumlicher Korrelationen ist es jedoch sinnvoll, dieses Vorgehen zu verfeinern. Dazu werden Troposphäre (für die feuchte) und Neutrosphäre (für die hydrostatische Komponente) in gleicher Weise wie im Falle der Ionosphäre auf eine effektiv wirksame Zentralschicht reduziert, und für die Koordinaten des Durchstoßpunktes des Sichtstrahls von der GPS-Antenne zum Satelliten werden dann die Daten interpoliert (vergleiche mit Abbildung 3.7). Diese Dislokations-Korrektur führt in analoger Weise zu den ionosphärischen Sub-Punkten *IP* auf die Sub-Punkte *FP* (für die feuchte Laufzeitverzögerung) und *HP* (für die hydrostatische Laufzeitverzögerung).

Die Rechenweise entspricht den in Abschnitt 3.4.9.1.1 gegebenen Formeln. Die Zentralschichten für die beiden Komponenten befinden sich jeweils in der Höhe h_z über der Station, bei welcher der Integralwert für den Luftdruck bzw. die feuchte Laufzeitverzögerung ihren Halbwert erreicht

$$p(h_{z[H]}) = \frac{1}{2} \cdot \int_{h_0}^{\infty} p(h) \cdot dh \quad \wedge \quad \delta S_{[F]}^{z=0}(h_{z[F]}) = \frac{1}{2} \cdot \int_{h_0}^{\infty} \delta S_{[F]}^{z=0}(h) \cdot dh \quad (3.107)$$

und wird mit numerischen Methoden berechnet.

Horizontale Interpolation

Bei der horizontalen Interpolation werden je nach Modell drei Verfahren angewandt. Die Interpolation über eine *gewichtete Mittelbildung* hat sich weitgehend bewährt, wobei die nächsten $2 \times 2 = 4$ (TROPEX, GTN) oder $3 \times 3 = 9$ (TropGrid) Nachbarpunkte um den zu interpolierenden Punkt herausgesucht werden. Anschließend werden die Gewichte w^*

$$w_i^* = \Delta s_{FP \rightarrow i}^{-c} \Rightarrow w_i = w_i^* \cdot \left(\sum_{i=1}^n w_i^* \right)^{-1} \quad (3.108)$$

aus der zur Potenz c erhobenen⁵³ reziproken sphärischen Distanz Δs zwischen Stationspunkt und Gitterpunkt i ermittelt und dann in das normierte Gewicht w überführt. Das als interpolierter Wert betrachtete gewichtete Mittel folgt dann mit

$$\delta S_{FP[F]}^{z=0} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \delta S_{i[F]}^{z=0} \quad , \quad (3.109)$$

hier beispielhaft für die feuchte Laufzeitverzögerung dargestellt⁵⁴. EMARDSON [1998, Aufsatz G] setzt einen auf Kollokation basierenden Interpolator ein. Er berechnet den Vektor der normierten Gewichte über den sog. *BLUE*⁵⁵

$$\underline{w} = \underline{\Sigma}_{n,n}^{-1} \cdot \underline{\Sigma}_{n,k} + \frac{\left(1 - \underline{\Sigma}_{n,k}^T \cdot \underline{\Sigma}_{n,n}^{-1} \cdot \underline{e} \right) \cdot \underline{\Sigma}_{n,n}^{-1} \cdot \underline{e}}{\underline{e}^T \cdot \underline{\Sigma}_{n,n}^{-1} \cdot \underline{e}} \quad , \quad (3.110)$$

was im Gegensatz zum vorhergehenden Ansatz das Einfließen kompletter stochastischer Informationen erlaubt. Dabei ist $\underline{\Sigma}_{n,n}$ die Kovarianzmatrix der n nächsten Gitterpunkt-Werte und $\underline{\Sigma}_{n,k}$ der Kovarianzvektor zwischen den n Gitterpunkten und dem Interpolationspunkt k , sowie \underline{e} der Einsektor (komplett gefüllt)⁵⁶. Diese Methode wird als Alternative bei der Interpolation in den TROPEX-

⁵³ Die Wahl für c fällt in Abhängigkeit von der Zielgröße zumeist auf einen Wert zwischen 1 und 2.

⁵⁴ horizontale Interpolation erfolgt nach Reduktion der Gitterpunktwerte auf Höhe des Interpolationspunktes

⁵⁵ BLUE = Best Linear Unbiased Estimator

⁵⁶ siehe auch SCHÜLER [2001, Abschnitt 4.4.5.3]

Gittern unterstützt, hat nach bisherigen Erfahrungen aber keine Genauigkeitssteigerung zur Folge. Als weitere gängige (und im GTN-Modell alternativ verwendete) Methode sei noch die bi-lineare Interpolation über die 4 nächsten Nachbarn erwähnt. Dabei werden aus den insgesamt vier Gleichungen

$$\delta S_{i[F]}^{z=0} = a + b \cdot \varphi_i + c \cdot \lambda_i + d \cdot \varphi_i \cdot \lambda_i \quad (3.111)$$

für $i = 1 \dots n$ die Koeffizienten a, b, c, d ermittelt und daraus dann mit der Breite φ_{FP} und Länge λ_{FP} der Wert am Interpolationspunkt berechnet.

Abbildungsfunktion

Wenig Beachtung wurde in dieser Arbeit der Abbildungsfunktion geschenkt, die zur Umrechnung der Laufzeitverzögerungen von der Zenitrichtung in die Sichtrichtung zum Satelliten dient. Die modernen und präzisen Abbildungsfunktionen haben nach HERRING [1992] im Allgemeinen die Form

$$m(\varepsilon) = \frac{1 + \frac{a_1}{1 + \frac{a_2}{1 + \frac{a_3}{\dots}}}}{\sin \varepsilon + \frac{a_1}{\sin \varepsilon + \frac{a_2}{\sin \varepsilon + \frac{a_3}{\dots}}}} \quad (3.112)$$

mit ε als Elevationswinkel zum Satelliten. Die Koeffizienten $a_{1...3}$ dieser Mapping-Funktion unterscheiden sich bzgl. der hydrostatischen und feuchten Komponente und sie können auch - je nach Ansatz - unterschiedlich zusammengesetzt sein. So verwendet NIELL [1996] Koeffizienten in Abhängigkeit von der Breite und Höhe, die auch saisonale Schwankungen wiedergeben⁵⁷, während HERRING [1992] in seinem Ansatz die Koeffizienten als Funktionen des Luftdrucks, der Temperatur und des partiellen Wasserdampfdrucks berechnet. Im Rahmen dieser Arbeit finden die Abbildungsfunktionen von NIELL und in eingeschränktem Maße auch von CHAO Anwendung⁵⁸. Eine neuere Entwicklung ist die von MENDES u.a. [2002]. Die Koeffizienten werden dort in der ersten Variante (MENDES A genannt) über die Funktion

$$a_i = a_{i0} + a_{i1} \cdot T_O + a_{i2} \cos \varphi + a_{i3} \cdot H \quad \wedge \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.113)$$

in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur T_O , der Breite φ der Station und der orthometrischen Höhe H ermittelt, wobei die Werte für a_{i0} , a_{i1} und a_{i3} in Tabelle 3.7 gegeben werden. In der Variante MENDES B werden - wie bei NIELL [1996] - keine meteorologischen Eingabedaten benötigt:

$$a_i = a_{i0} + (a_{i1} + a_{i2} \cdot \varphi_d^2) \cdot \cos \left(2\pi \cdot \frac{t_D - \Delta t_W}{365,25 [d]} \right) + a_{i3} \cdot H + a_{i4} \cos \varphi \quad . \quad (3.114)$$

Die Zeit t_D wird in Tagen des Jahres gegeben, die Phasenverschiebung Δt_W entspricht wie bisher dem Tag des »maximalen Winters« (kältester Tag im meteorologischen Sinne).

Diese zweite Variante wird hier ebenfalls verwendet. Allgemein kann bzgl. des heutigen Standes der Modellierung der Abbildungsfunktionen festgestellt werden, dass die Restfehler durch diese Funktionen bei den hier verwendeten Elevationsmasken von 15° bzw. 10° und gewöhnlichen Wetterlagen hinreichend gering sind, unterhalb dieser Grenze dann nach den Ergebnissen von KRUEGER [2004] jedoch stärker differieren. Da die Signale unterhalb von 10° Elevation jedoch nicht

⁵⁷ Ansatz korrespondiert mit den »blinden« Troposphärenmodellen, die ebenfalls keine Messdaten benötigen

⁵⁸ mehr Details finden sich in SCHÜLER [2001, Abschnitt 3.2.3]

nur ein höheres Rauschen aufweisen, sondern auch stärker durch Mehrwegefehler und Phasensprünge korrumpt werden, ist eine Nutzung dieser Signale - wenn kein Zwang zu ihrer Verwendung besteht - ohnehin nicht ratsam.

<i>Koeffizient</i>	<i>MENDES A</i>	<i>MENDES B</i>
a_{10}	$12100,8 \cdot 10^{-7}$	$11613,1 \cdot 10^{-7}$
a_{11}	$1729,5 \cdot 10^{-9}$	$-933,8 \cdot 10^{-8}$
a_{12}	$319,1 \cdot 10^{-7}$	$-595,8 \cdot 10^{-11}$
a_{13}	$-1847,8 \cdot 10^{-11}$	$-2462,7 \cdot 10^{-11}$
a_{14}		$1286,4 \cdot 10^{-7}$
a_{20}	$30496,5 \cdot 10^{-7}$	$29815,1 \cdot 10^{-7}$
a_{21}	$234,6 \cdot 10^{-8}$	$-56,9 \cdot 10^{-7}$
a_{22}	$-103,5 \cdot 10^{-6}$	$-165,5 \cdot 10^{-10}$
a_{23}	$-185,6 \cdot 10^{-10}$	$-272,5 \cdot 10^{-10}$
a_{24}		$302,0 \cdot 10^{-7}$
a_{30}	$6877,7 \cdot 10^{-5}$	$68183,9 \cdot 10^{-6}$
a_{31}	$197,2 \cdot 10^{-7}$	$93,5 \cdot 10^{-6}$
a_{32}	$-345,8 \cdot 10^{-5}$	$-239,4 \cdot 10^{-9}$
a_{33}	$106,0 \cdot 10^{-9}$	$30,4 \cdot 10^{-9}$
a_{34}		$-230,8 \cdot 10^{-5}$

Tabelle 3.7: Koeffizienten a_{ij} der Abbildungsfunktionen MENDES A und MENDES B.

<i>Beschreibung des Fehlers</i>	<i>Abschnitt</i>	<i>Behandlung</i>
Messrauschen der Trägerphasen	3.3.1	stochastisch, auf Beobachtungsebene, algebraische Korrelationen können berücksichtigt werden
Hardware-Biase	3.3.2	keine; Elimination durch doppelte Differenzbildung oder Bestimmung durch Empfänger selbst möglich
Antennen-Exzentrizität	3.3.3.1	funktional; Restfehler stochastisch auf Koordinatenebene
Phasenzentrumskorrektur	3.3.3.2	funktional auf Koordinaten- und Beobachtungsebene; Restfehler stochastisch auf Koordinatenebene; bei Satellit im Erdschatten: stochastische Modellierung
Orientierungskorrektur	3.3.3.3	funktional auf Beobachtungsebene (nur statisch)
Synchronisation	3.3.4	funktional auf Beobachtungsebene
Phasensprünge (»Cycle Slips«)	3.4.1	funktional (Detektion)
Mehrweg und Signalbeugung	3.4.2	stochastisch; auch interaktiv über Analyse der Residuen
Relativistische Effekte	3.4.3	funktional auf Beobachtungsebene
Bewegungskorrektur	3.4.4	funktional auf Koordinatenebene
Gezeiten der festen Erde	3.4.5	funktional auf Koordinatenebene
Ozeanische Auflasten	3.4.6	funktional auf Koordinatenebene
Erdrotation, Polbewegung	3.4.7	funktional auf Koordinatenebene
Satellitenbahn	3.4.8	stochastisch auf Beobachtungsebene, auch Abschätzung der systematischen Fehlerwirkung
Ionosphäre	3.4.9.1	funktional auf Beobachtungsebene, stochastisch, auch Abschätzung der systematischen Fehlerwirkung
Troposphäre und Stratosphäre	3.4.9.2	funktional auf Beobachtungsebene, stochastisch, auch Abschätzung der systematischen Fehlerwirkung

Tabelle 3.8: Fehlerquellen bzw. Korrekturen in der präzisen Analyse von GPS-Daten und ihre Behandlung.

3.5 Behandlungsmethodik

Tabelle 3.8 fasst die in diesem Kapitel behandelten Fehlerquellen zusammen und geht auf die Behandlungsmethodik ein.

Grundsätzlich kann hier die funktionale Modellierung von der stochastischen unterschieden werden. Im ersten Fall besteht die Möglichkeit, den Fehler mit Hilfe von Modellen u.ä. zu beschreiben, während im zweiten Fall die Unsicherheiten erfasst und letztlich in der Kovarianzmatrix der Beobachtungen aufgenommen werden, um eine korrekte Gewichtung zu gewährleisten. Weiterhin wird bei bestimmten Fehlergrößen noch eine Abschätzung der systematischen Fehlerwirkung vorgenommen. Die Modellierung erfolgt dabei entweder auf Beobachtungsebene, d.h. die Beobachtungen werden korrigiert, oder auf Koordinatenebene, in bestimmten Fällen auch auf beiden Ebenen (z.B. bei den Phasenzentrums-Korrekturen).

3.5.1 Beobachtungsgleichung

Die funktional modellierten Korrekturen erweitern die Beobachtungsgleichung der Trägerphasenmessungen, so dass sich

$$\begin{aligned} \nabla \Delta \phi_{AB, L_i}^{ij} \cdot \lambda_{L_i} + v = & \nabla \Delta \rho_{AB, L_i}^{ij} + \nabla \Delta \delta S_{AB, L_i [PCV]}^{ij} - \nabla \Delta N_{AB, L_i}^{ij} \cdot \lambda_{L_i} \\ & + \nabla \Delta \delta S_{AB, L_i [ORI]}^{ij} + \nabla \Delta \delta S_{AB [SYNC]}^{ij} + \nabla \Delta \delta S_{AB [REL]}^{ij} \\ & - \nabla \Delta \delta S_{AB, L_i [ION]}^{ij} + \nabla \Delta \delta S_{AB [H]}^{ij} + \nabla \Delta \delta S_{AB [F]}^{ij} \end{aligned} \quad (3.115)$$

λ :	Wellenlänge der Trägerwelle
$\nabla \Delta N$:	Mehrdeutigkeitsterm
$\nabla \Delta \rho$:	geometrische Entfernung in doppelter Differenzform
$\nabla \Delta \delta S_{[PCV]}$:	Phasenzentrumskorrektur
$\nabla \Delta \delta S_{[ORI]}$:	Orientierungskorrektur (<i>»Phase Wind-Up«</i>)
$\nabla \Delta \delta S_{[SYNC]}$:	Synchronisationskorrektur
$\nabla \Delta \delta S_{[REL]}$:	relativistische Korrektur (<i>»Radar Delay«</i>)
$\nabla \Delta \delta S_{[ION]}$:	ionosphärische Laufzeitverzögerung
$\nabla \Delta \delta S_{[H]}$:	hydrostatische Laufzeitverzögerung in Troposphäre und Stratosphäre
$\nabla \Delta \delta S_{[F]}$:	feuchte Laufzeitverzögerung in Troposphäre

exemplarisch für doppelte Differenzen auf Trägerwelle L_i ergibt. Das stochastische Modell der Beobachtungen baut sich maßgeblich aus den Teilmatrizen

$$\underline{\Sigma}_{LL} = \underline{\Sigma}_{\nabla \Delta \phi} + \underline{\Sigma}_{\nabla \Delta \phi [MW]} + \underline{\Sigma}_{\nabla \Delta \phi [SAT]} + \underline{\Sigma}_{\nabla \Delta \phi [ION]} + \underline{\Sigma}_{\nabla \Delta \phi [H]} + \underline{\Sigma}_{\nabla \Delta \phi [F]} \quad (3.116)$$

$\underline{\Sigma}_{\nabla \Delta \phi}$:	Kovarianzmatrix der Phasenmessgenauigkeiten
$\underline{\Sigma}_{\nabla \Delta \phi [MW]}$:	Stochastisches Modell zur Mehrweg-Mitigation auf SNR-Basis
$\underline{\Sigma}_{\nabla \Delta \phi [SAT]}$:	Kovarianzmatrix der Satelliten-Koordinatenfehler (Schattendurchlauf inkl.)
$\underline{\Sigma}_{\nabla \Delta \phi [ION]}$:	Kovarianzmatrix der ionosphärischen Laufzeitverzögerungen
$\underline{\Sigma}_{\nabla \Delta \phi [H]}$:	Kovarianzmatrix der hydrostatischen Laufzeitverzögerungen
$\underline{\Sigma}_{\nabla \Delta \phi [F]}$:	Kovarianzmatrix der feuchten Laufzeitverzögerungen

auf, wobei sich eine Abschätzung für die systematischen Fehler in den doppelten Differenzen aus

$$\underline{l}_{\Delta} = \underline{l}_{\Delta [SAT]} + \underline{l}_{\Delta [ION]} + \underline{l}_{\Delta [H]} + \underline{l}_{\Delta [F]} \quad (3.117)$$

ergibt, also die systematischen Wirkungen der Satellitenrestfehler sowie jener der atmosphärischen Refraktion wiederzugeben versucht. Die Elemente der einzelnen Vektoren sind dabei stets positiv.

3.5.2 Koordinatengleichung

Eine Reihe von funktional erfassbaren Korrekturen wird auf Koordinatenebene angebracht, so dass sich der Positionsvektor - hier nur für L_i - in der Form

$$\underline{X}(t)_{[L_t]} = \underline{X} + \delta\underline{X}_{[AE]} + \delta\underline{X}_{[L_t][PCV]} + \delta\underline{X}(t)_{[VSP]} + \Delta\underline{X}(t)_{[GZ]} + \Delta\underline{X}(t)_{[OA]} + \Delta\underline{X}(t)_{[ER]} + \Delta\underline{X}(t)_{[PT]} \quad (3.118)$$

\underline{X} : fester Positionsvektor, bezogen auf eine bestimmte Referenzepoche

$\delta\underline{X}_{[AE]}$: Korrekturvektor auf Grund der Exzentrizität der Antenne

$\delta\underline{X}_{[PCV]}$: Korrekturvektor auf Grund des Phasenzentrums-Offset (für L_t)

$\delta\underline{X}_{[VSP]}$: Korrekturvektor auf Grund der plattentektonischen Bewegung, saisonaler Variationen, Druckauflasten

$\delta\underline{X}_{[GZ]}$: Korrekturvektor auf Grund der Gezeiten der festen Erde

$\delta\underline{X}_{[OA]}$: Korrekturvektor auf Grund der ozeanischen Auflasten

$\delta\underline{X}_{[ER]}$: Korrekturvektor auf Grund der Variation der Erdrotationsparameter (sub-täglich)

$\delta\underline{X}_{[PT]}$: Korrekturvektor auf Grund der Poltide

schreiben lässt. Die Kovarianzmatrix für $\underline{X}(t)$

$$\underline{\Sigma}_{X_t X_t} = \underline{\Sigma}_{XX} + \underline{\Sigma}_{XX[VSP]} + \underline{\Sigma}_{XX[AE]} + \underline{\Sigma}_{XX[PCV]} \quad (3.119)$$

berücksichtigt die Unsicherheiten der gegebenen Startkoordinaten zur Referenzepoche⁵⁹, die Restfehler in den Geschwindigkeitsreduktionen sowie etwaige Fehler in der Antennenexzentrizität und den Phasenzentrums-Offsets.

3.5.3 Test der Mehrdeutigkeitsfixierung

Die Abschätzung der systematischen Fehlerwirkung geschieht im Wesentlichen zu einem bestimmten Zweck, nämlich zur Erweiterung der Testprozedur bzgl. der korrekten Fixierung von Mehrdeutigkeiten, denn dieser Prozess ist vergleichsweise anfällig gegenüber systematischen Fehlern. Eine Fehlerfixierung kann bei Vorliegen derartiger Fehler zumeist nur schwer bemerkt werden, hat im nachfolgenden Prozessierungsschritt dann aber einschneidende (negative) Auswirkungen.

Aus den systematischen Fehlern im Beobachtungsraum ergeben sich jene im Parameterraum gemäß

$$\underline{x}_\Delta = \underline{Q}_{xx} \cdot (\underline{A}^T \cdot \underline{P} \cdot \underline{L}_\Delta) \quad \underline{x}_\Delta = [\dots \quad \underline{N}_\Delta \quad \dots]^T, \quad (3.120)$$

und dieser Vektor enthält unter anderem auch den systematischen Fehlereinfluss \underline{N}_Δ auf die als Fließkommazahlen bestimmten Mehrdeutigkeiten $\nabla\Delta\underline{N}$. Die erweiterte Testprozedur kann vergleichsweise einfach implementiert werden: Sei $\nabla\Delta\underline{N}^*$ der originäre Vektor der fixierten Mehrdeutigkeiten, der aus $\nabla\Delta\underline{N}$ und der zugehörigen Kovarianzmatrix hervorgegangen ist. Nun werden zwei veränderte Vektoren

$$\nabla\Delta\underline{N}^P = \nabla\Delta\underline{N} + \nabla\Delta\underline{N}_{\Delta i} \quad \wedge \quad \nabla\Delta\underline{N}^M = \nabla\Delta\underline{N} - \nabla\Delta\underline{N}_{\Delta i} \quad (3.121)$$

berechnet, jeweils durch Addition bzw. Subtraktion (zweiseitiger Test) des systematischen Fehlervektors $\nabla\Delta\underline{N}_{\Delta i}$, der in der Zeile i mit dem systematischen Fehlerwert für die zugehörige Mehrdeutigkeitskombination besetzt ist. Anschließend wird für diese beiden Vektoren eine Mehrdeutigkeitsuche durchgeführt, woraus die Vektoren $\nabla\Delta\underline{N}^{P*}$ sowie $\nabla\Delta\underline{N}^{M*}$ mit den fixierten Mehrdeutigkeiten hervorgehen. Nur wenn dieser systematische Fehler keine Auswirkung auf das Ergebnis der Fixierung hat, also die Bedingung

$$\nabla\Delta\underline{N}^* - \nabla\Delta\underline{N}^{P*} = \underline{O} \quad \wedge \quad \nabla\Delta\underline{N}^* - \nabla\Delta\underline{N}^{M*} = \underline{O} \quad (3.122)$$

erfüllt ist, darf das in $\nabla\Delta\underline{N}^*$ enthaltene Ergebnis akzeptiert werden. Diese Variationsrechnung wird für alle $i = 1 \dots n$ Mehrdeutigkeitskombinationen durchlaufen. Sämtliche Kandidaten, die dabei Verschiebungen aufweisen, also in der Differenz um einen Zyklus oder mehr abweichen, werden als »nicht fixierbar« verworfen. Auf Grund der Schnelligkeit heutiger Suchverfahren fallen diese zusätzlichen Durchläufe kaum zeitlich auf.

⁵⁹ Nullmatrix, wenn Koordinaten als Unbekannte geschätzt werden.

4. Bezugssystem und Referenzstationen

Gegenwärtige wissenschaftliche Problemstellungen stellen nicht nur hohe Anforderungen an die zur kinematischen Positionslösung erforderlichen Algorithmen, sondern verlangen auch die Anbindung an Referenzstationen, die im gewünschten Referenzsystem sauber positioniert wurden. In diesem Kapitel soll deshalb beispielhaft das für den europäischen Raum errichtete Referenzsystem vorgestellt werden und auf die Frage seiner Instandhaltung bzw. »Aufdatierung« eingegangen werden. Anschließend wird die Modellierung und Prädiktion der Koordinaten von Referenzstationen durch Methoden der Zeitreihenanalyse diskutiert.

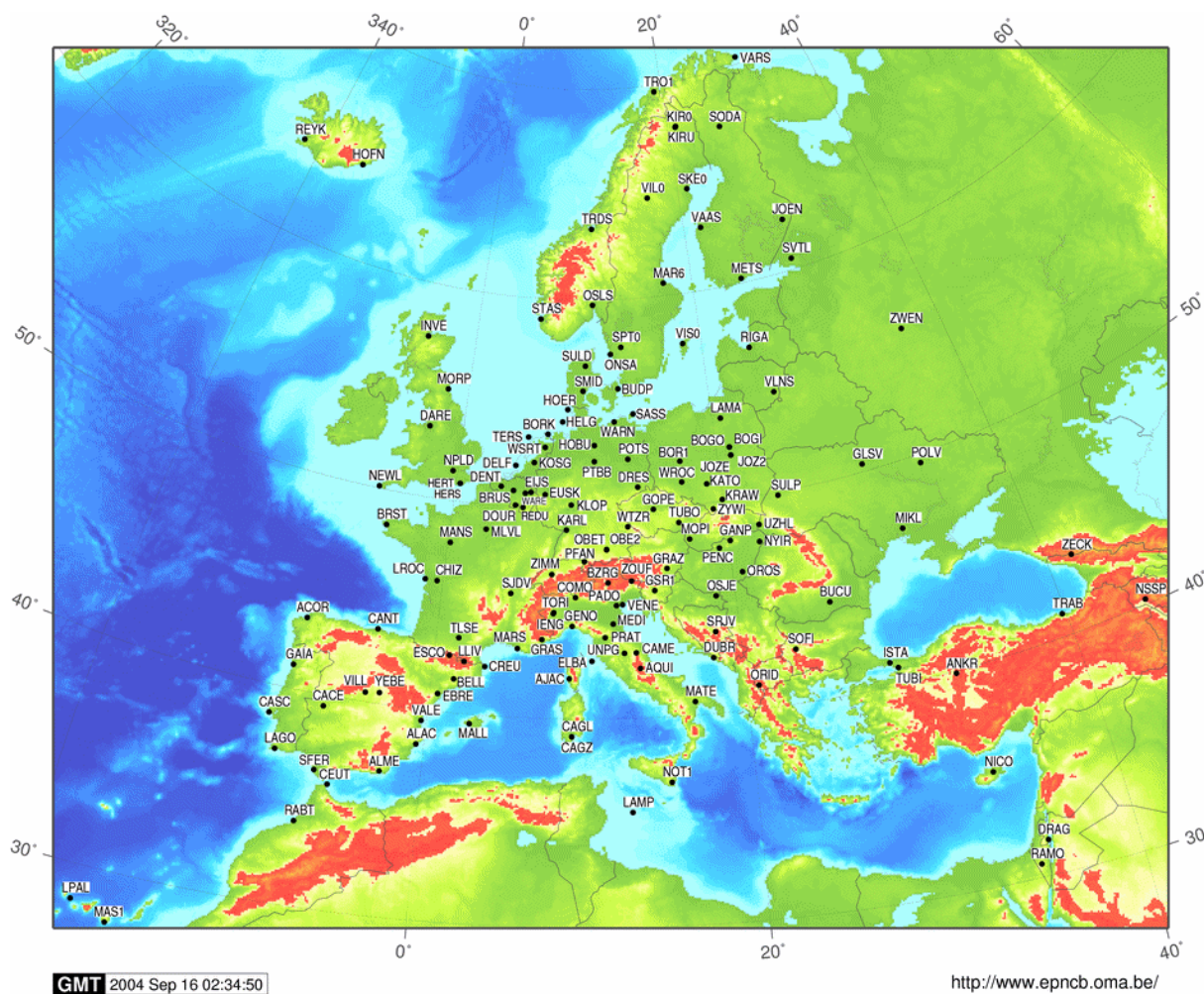


Abbildung 4.1: Gegenwärtiger Ausbaustand bzgl. der Permanentstationen des EUREF Netzwerkes, auf deren Datenbasis das European Terrestrial Reference System (ETRS) realisiert wird.

4.1 ETRS als Beispiel für ein modernes Bezugssystem

Im Jahre 1984 wurde das *World Geodetic System 1984* (WGS84) vom amerikanischen Verteidigungsministerium mit Hilfe von NNSS Transit Doppler-Messungen als dreidimensionales Referenzsystem eingerichtet¹. Auf Grund der geringeren Genauigkeit der Doppler-Messungen und der Zielsetzung der Schaffung eines Bezugssystems für die Navigation - weniger der hochpräzisen Positionierung - wies es lediglich eine Genauigkeit im Bereich von ungefähr 1 bis 2 m auf, was beispielsweise für großräumige geodynamische Anwendungen nicht ausreichend ist. Bereits 1987 wurde der *International Earth Rotation Service* (IERS) gegründet, der nach dem Aufbau eines Netzwerkes von 130 Messstationen den

¹ siehe BOLJEN [1996]

International Terrestrial Reference Frame (ITRF) bestimmte². Dazu wurden VLBI-Messungen (*Very Long Baseline Interferometry*) zur Orientierung des Netzes, SLR-Messungen (*Satellite Laser Ranging*) zur Lagerung des Systems und GPS-Messungen zur Netzverdichtung genutzt. Die Standardabweichungen des ITRF betragen ca. 1 bis 3 cm.

Terrestrial Reference System »Reference System«: konzeptioneller Ansatz	Terrestrial Reference Frame »Reference Frame«: Realisierung durch Messungen
ITRS: International Terrestrial Reference System	ITRF: International Terrestrial Reference Frame bisherige Realisierungen: <i>ITRF92, 93, 94, 96, 97, 2000, 2005</i>
ETRS: European Terrestrial Reference System EUREF: IAG Reference Frame Sub-Commission for Europe	ETRF: European Terrestrial Reference Frame bisherige Realisierungen: <i>ETRF89, 90, 91, 92, 93, 94, 96, 97, 2000</i> <i>ETRF89</i> ist Partiallösung des <i>ITRF89</i> auf Grund der Fixierung von 15 ITRF-Punkten auf der eurasischen Platte.

Tabelle 4.1: Gegenüberstellung der Begriffe »Reference System« und »Reference Frame« nach dem üblichen englischen Sprachgebrauch gemäß SEEBER [1989, 1992] sowie wichtige Begriffe zum globalen Standard ITRS/ITRF und der europäische Verdichtung ETRS/ETRF.

Das *European Terrestrial Reference System* (ETRS) wird durch GPS-Messungen über den *European Terrestrial Reference Frame* (ETRF) realisiert. In seiner erstmaligen Realisierung mit der Bezugsepoche 1989 (ETRS89, ETRF89) erfolgte seine Festlegung durch die Fixierung von 15 ITRF-Punkten auf der europäischen Kontinentalplatte. Es kann somit als eine Verdichtung des ITRF für den europäischen Raum aufgefasst werden. Tabelle 4.1 stellt die Konzepte und Realisierungen gegenüber.

4.1.1 Konzept

Die wesentlichen Erfordernisse, die an das aus das durch ETRF realisierte ETRS erfüllen soll, lassen sich nachfolgend zusammenfassen:

- Der *European Geodetic Reference Frame* soll ein geozentrisches Bezugssystem auf dem europäischen Teil der eurasischen Platte für alle präzisen Anwendungen im Bereich der Geodäsie und Geodynamik darstellen.
- Es soll nicht von den verschiedenen nationalen Datumsfestlegungen innerhalb Europas abgeleitet werden, sondern ein homogenes, sich über den gesamten Kontinent erstreckendes Referenzsystem sein.
- Die Realisierung dieses präzisen Bezugssystems soll sich möglichst genau an das ITRF annähern³.

Weiterhin erfolgte für die Berechnung der partiellen ITRF-Lösung zur Referenzepoche 1989,0 eine Einbeziehung der Daten von 35 europäischen VLBI- sowie SLR-Stationen. Der ETRF89 entspricht somit nach ADAM et al. [1999] einer Partiallösung der globalen ITRF89-Lösung. ETRS89 rotiert mit dem stabilen Teil Europas, schließt also eine plattentektonische Bewegung mit einer festgesetzten Rate von 2,5 cm pro Jahr ein. Auf Grund dieser Tatsache müssen die Transformationsparameter in Richtung des ITRF in regelmäßigen Abständen aktualisiert und für die Nutzergruppen veröffentlicht werden.

² siehe BOUCHER und ALTAMINI [1996]

³ Dem ITRF wurde gegenüber dem WGS84 der Vorzug gegeben, doch wurde letzteres zwischenzeitlich ebenfalls an das ITRF angeglichen; siehe MERRIGAN et al. [2002].

4.1.2 Genauigkeitsklassen

Nach ADAM et al. [1999] ergeben sich für das EUREF insgesamt drei Genauigkeitsklassen:

- Klasse A:* Genauigkeit von 1 cm (1σ) für jede der drei Koordinatenkomponenten im ETRS unabhängig von der Epoche. Die Realisierung dieser Genauigkeitsklasse erfolgt durch permanente GPS Beobachtungen.
- Klasse B:* Genauigkeit von 1 cm, jedoch nur gültig zu einer bestimmten Referenzepoche. Die Realisierung erfolgte durch GPS Feldkampagnen seit 1993.
- Klasse C:* Genauigkeit von 5 cm durch Auswertung der Feldkampagnen von 1989 bis 1992.

Die Klassen B und C können dabei eher als historisch betrachtet werden, wohingegen die zur Genauigkeitsklasse A führende routinemäßige Auswertung der Daten von EUREF Permanentstationen das gegenwärtig übliche Vorgehen bzgl. der Instandhaltung eines Bezugssystems durch kontinuierliches Monitoring darstellt. In diesem Sinne besteht das wesentliche Produkt von EUREF neben den Beobachtungsdaten der Netzstationen in einer über jeweils 7 Wochentage zusammengefassten Kombinationslösung, die im einheitlichen SINEX-Format (*Solution Independent Exchange Format*) zur Verfügung gestellt wird. Auch in dieser Wochenlösung erfolgt eine enge Anpassung an den ITRF, indem die Koordinaten ausgewählter Referenzstationen festgehalten werden. Diese wöchentliche Koordinatenlösung bezieht sich in praktischer Hinsicht somit auf den ITRF zur entsprechenden Referenzepoche, wobei die Koordinaten der fixierten ITRF Stationen monatlich über die zuvor bestimmten Geschwindigkeitsfelder linear fortgeführt werden⁴.

4.1.3 Auswertestrategie

Die Analysestrategie basiert auf der Nutzung genauer Satellitenorbits (Finale IGS Bahnen aus einer Kombinationslösung) mit den zugehörigen Erdorientierungsparametern. Die Koordinaten der festgehaltenen Stationen müssen sich dabei auf die Referenzepoche t_{ITRF} des ITRF beziehen, in welchem die Satellitenpositionen vorliegen. Sie werden linear über die zugehörigen Geschwindigkeiten auf die aktuelle Beobachtungsepoche t_{BEOB} extrapoliert. Anschließend erfolgt die Koordinatenschätzung der Positionen, die sich auf eben diese Epoche beziehen. Sie werden danach über

$$\underline{x}_{ETRS89} = \underline{x}_{ITRF}(t_{BEOB}) + \Delta \underline{x} + \underline{R} \cdot \dot{\underline{x}}_{ITRF}(t_{BEOB}) \cdot (t_{BEOB} - t_{ETRS89}) \quad (4.1)$$

mit den publizierten Transformationsparametern in das ETRS89 überführt, wobei \underline{x}_{ETRS89} den Koordinatenvektor zur Bezugsepoche t_{ETRS89} (also 1989,0) in diesem Bezugssystem darstellt und \underline{x}_{ITRF} jenen im ITRF zur Beobachtungsepoche t_{BEOB} . Der Differenzvektor $\Delta \underline{x}$ enthält die Translationsparameter zur Datumstransformation und \underline{R} stellt die zugehörige Rotationsmatrix dar.

4.2 Modellierung von Koordinatenänderungen

Die Koordinaten einer Referenzstation sind keine konstanten Größen, sondern verändern sich mit der Zeit. Diese Feststellung gilt zumindest dann, wenn sie sich auf ein Bezugssystem beziehen, dessen Verankerung (Ausdehnung) mindestens zwei tektonische Platten überspannt, da sich jene relativ zueinander bewegen. Tektonische Plattenbewegungen liegen im Allgemeinen in der Größenordnung weniger Zentimeter pro Jahr, was für präzise Anwendungen jedoch bereits die Signifikanzschwelle deutlich überschreitet. Diese Bewegung kann in guter Näherung als lineare Funktion beschrieben werden. Allerdings zeigt ein genauerer Blick auf die Zeitreihen weitere Einflussfaktoren, beispielsweise saisonale Variationen, die verschiedene Ursachen haben und zu einem gewissen Anteil in einem erweiterten Bewegungsmodell aufgefangen werden können. Schließlich können noch Luftdruckänderungen zu signifikanten Deformationen der Erdoberfläche und somit zur Veränderung der Stationskoordinaten führen.

⁴ siehe auch Abschnitt 4.2.1

4.2.1 Lineares Bewegungsmodell

Die einfachste Form der Beschreibung von Koordinatenveränderungen erfolgt durch die Berücksichtigung eines Geschwindigkeitsvektors, der (innerhalb eines bestimmten Zeitfensters) als zeitlich invariabel betrachtet wird. Mit diesem Ansatz können die Plattenbewegungen in guter Näherung kompensiert werden, die im strengen Sinne zwar nicht linear verlaufen. Vielmehr handelt es sich im kinematischen Sinne um die Rotation von Plattenfragmenten auf einer Kugel- bzw. Ellipsoidschale⁵, doch erfüllt der lineare Ansatz innerhalb der vergleichsweise kurzen Zeitintervalle, die hier betrachtet werden, seinen Zweck.

4.2.1.1 Modellfunktion

Beziehen sich die gegebenen Koordinaten \underline{x} für eine Referenzstation auf die Referenzepoche t_{REF} und ist ein für das gewählte Bezugssystem gültiger Geschwindigkeitsvektor \underline{v} bekannt, so ergibt sich der Positionsvektor zur Beobachtungsepoche t_{BEOB} im gleichen Bezugssystem zu

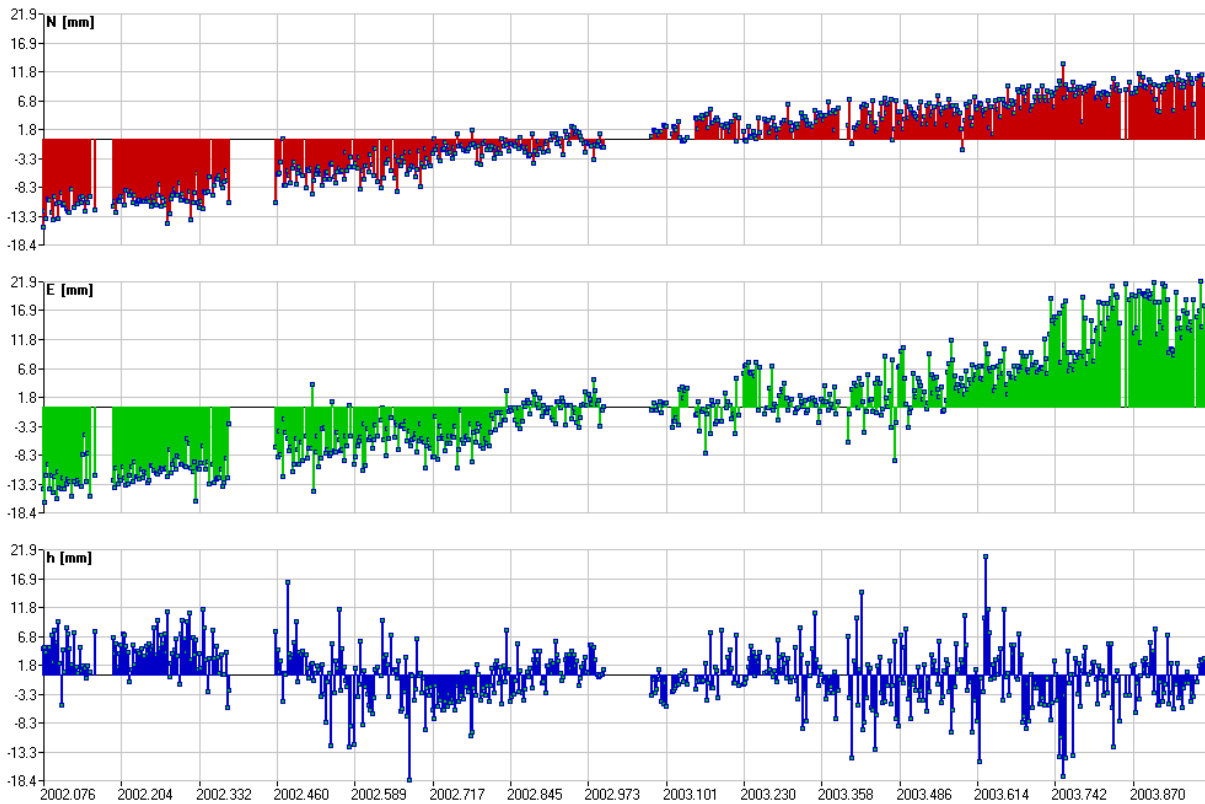


Abbildung 4.2: Koordinatenzeitreihe der Referenzstation IF1A für einen Zeitraum von etwas weniger als 2 Jahren. Die erkennbaren Datenlücken sind auf ein Problem mit der Datensynchronisation im Jahre 2002 sowie mit einem Datenverarbeitungsproblem im Bereich Ende 2002/Anfang 2003 zu begründen. Im Gegensatz zu den nachfolgenden Darstellungen von geglätteten Wochenlösungen werden hier Tageslösungen gezeigt.

$$\underline{x}(t_{BEOB}) = \underline{x}(t_{REF}) + \underline{v} \cdot (t_{BEOB} - t_{REF}) = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{t_{REF}} + \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} \cdot (t_{BEOB} - t_{REF}) \quad (4.2)$$

Die ITRF-Lösungen sind beispielsweise als Tabellen digital verfügbar, die genau diese Informationen für die verwendeten Datumpunkte enthalten. In der einfachsten Form wird ein Punkt somit nicht nur durch sein Koordinatentripel, sondern zusätzlich mindestens noch durch den zugehörigen Geschwindigkeitsvektor beschrieben.

⁵ siehe auch Abschnitt 4.2.1.3

Am Beispiel der Referenzstation IF1A des Instituts für Erdmessung und Navigation kann der weitgehend lineare Verlauf der in Abbildung 4.2 dargestellten Koordinatenzeitreihe nachvollzogen werden. Die täglichen Punktlösungen wurden zunächst über eine Kalman-Filterung als zwangsfreies Netz mit der Station GRAZ als Datumspunkt (linear prädierte ITRF-Koordinaten) unter Einschluss der Stationen WTZR (Wetzell) und OBE2 (Oberpfaffenhofen) gewonnen und anschließend über eine Ähnlichkeitstransformation (»S-Transformation« mit Gesamtpurminimierung) in eine freie Netzlösung überführt. Die Tageslösungen zeigen die größte Streuung im vertikalen Koordinatenkanal, was für die GPS-Positionierung nicht untypisch ist. Die lineare Trendabsplattung führt auf eine Nordgeschwindigkeit von 11,5 mm/a, eine Ostkomponente von 14,2 mm/a und eine Radialkomponente von -2,3 mm/a. Die formalen empirischen Standardabweichungen liegen bei rund 0,4 mm/a für die horizontale und 0,6 mm/a für die vertikale Geschwindigkeit.

4.2.1.2 Genauigkeitsabschätzung

Es darf jedoch unterstellt werden, dass die zuvor präsentierte empirische Genauigkeitsabschätzung zu optimistisch ist - ein Problem, das in der Ausgleichung der GPS-Zeitreihen auf Grund vorhandener Auto-Korrelation häufig auftritt⁶ und in der wissenschaftlichen Literatur gelegentlich auch adressiert wird. Verschiedene Untersuchungen der Rauschanteile für die vertikale Komponente finden sich beispielsweise in WILLIAMS et al. [2003]. Eine Auflistung ermittelter Genauigkeitswerte wird von CAMPBELL [2003] für Zeitintervalle Δt größer als 1 Jahr gegeben. Sie wird hier verwendet, um dem Anwender eine einfach nutzbare Funktion zur Abschätzung realistischer Standardabweichungen für die Geschwindigkeiten der radialen Koordinatenkomponente an die Hand zu geben. Die beiden nötigen Koeffizienten wurden über eine Ausgleichung bestimmt und führen auf die Formel

$$\sigma_{v_h} \approx 1,92 \left[\frac{\text{mm}}{\text{Jahr}} \right] \cdot \left(\frac{\Delta t}{q} \right)^{-1,34} \quad \wedge \quad \Delta t > 1 [\text{Jahr}] \quad (4.3)$$

mit Δt als Zeitintervall (in Jahren) und $q = 1 [\text{Jahr}]$ als Skalierungsfaktor, der lediglich aus Gründen einer bzgl. der Einheiten korrekten Darstellung der Formel eingeführt wird.

4.2.1.3 Ableitung von Geschwindigkeitsvektoren für Neupunkte

Für eine neu errichtete Referenzstation sind die Geschwindigkeiten zunächst auf Grund der erst im Entstehen begriffenen Koordinaten-Zeitreihe meistens unbekannt. In diesen Fällen können geodynamische Bewegungsmodelle oder geeignete Interpolationsmethoden erste Werte liefern.

4.2.1.3.1 Starrkörperbewegung

Ein weit verbreiteter Modellansatz betrachtet die einzelnen Platten als starre Körper, die auf der ozeanischen Kruste »schwimmen«. Dabei wird vorausgesetzt, dass Deformationen innerhalb dieser Platte entweder nicht vorhanden oder insignifikant sind.

Verändert ein starres Flächenstück auf der Oberfläche einer Kugel seine Position, so lässt sich gemäß Abbildung 4.3 nach dem Theorem von EULER⁷ diese Lageänderung als eine Rotation um eine Achse durch den Mittelpunkt der Kugel auffassen. Die Schnittpunkte dieser Achse mit der Kugeloberfläche sind die Rotationspole. Zur Beschreibung des Rotationsvektors dienen drei Parameter: 2 Richtungsparameter (z. B. die geographischen Koordinaten des Schnittpunktes φ und λ mit der Kugeloberfläche) sowie der zugehörige Drehwinkel bzw. die Rotationsgeschwindigkeit ω (Vorzeichenkonvention: positiv bei Rotation im Uhrzeigersinn, gesehen vom Mittelpunkt der Kugel aus).

Alle Punkte einer solchen rotierenden Platte bewegen sich auf Kleinkreisen um den Rotationspol Ω . Daher ist jeder Rand dieser Platte, der nicht parallel zu einem solchen Kleinkreis liegt, entweder

⁶ siehe zu diesem Thema auch Abschnitt 2.3.2.1.3

⁷ siehe GEISS [1987]

»produktiv« oder »destruktiv«. Der Zusammenhang zwischen der Bewegung eines Punktes auf der Platte und dem Rotationsvektor dieser Platte wird im geozentrischen kartesischen Koordinatensystem durch

$$\frac{d\mathbf{R}}{dt} = \mathbf{v}_{AB} = \mathbf{\Omega}_{AB} \times \mathbf{R} \Rightarrow \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix}_K = \begin{pmatrix} \omega_y \cdot z_K - \omega_z \cdot y_K \\ \omega_z \cdot x_K - \omega_x \cdot z_K \\ \omega_x \cdot y_K - \omega_y \cdot x_K \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

ausgedrückt. Dabei ist \mathbf{v}_{AB} der Geschwindigkeitsvektor eines Punktes auf der Platte B relativ zu einem Punkt auf der Platte A , $\mathbf{\Omega}_{AB}$ der Rotationsvektor von Platte B relativ zu A und \mathbf{R} der Radius- oder Ortsvektor vom Mittelpunkt der Erde zum betreffenden Aufpunkt. Die obige Formel gibt die Beziehungen für einen Punkt K wieder.

Die differentielle Bewegung einer Kugelkappe lässt sich also durch einen einzigen geozentrischen Rotationsvektor beschreiben. Als Nebenbedingung wird häufig der Zusammenhang zwischen den Rotationsvektoren verschiedener Platten eingeführt:

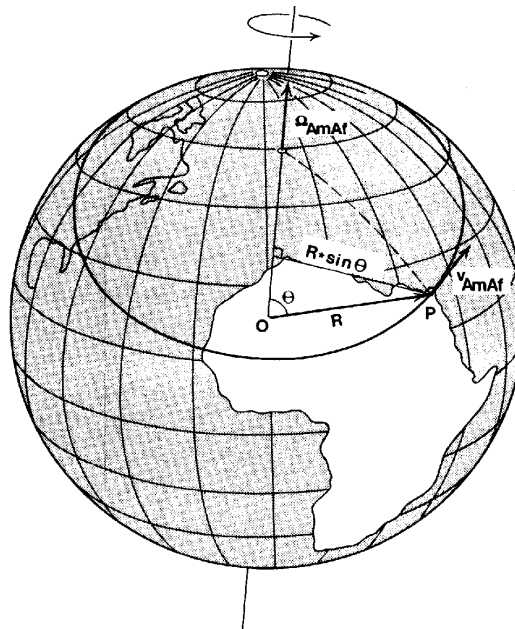


Abbildung 4.3: Zusammenhang zwischen der Bewegung eines Punktes P auf einer Platte und der zugehörigen Rotationsgeschwindigkeit um den Rotationspol; nach GEISS [1987].

$$\mathbf{\Omega}_{AB} + \mathbf{\Omega}_{BC} + \mathbf{\Omega}_{CA} = \mathbf{0} \quad (4.5)$$

Das Integral der Bewegungen über die gesamte Erdoberfläche soll eine Nullsumme ergeben. Diese Bedingung wird auch als »No Net Rotation« bezeichnet. Als Bezugssystem wird häufig die Fixierung einer Platte, zumeist der Pazifik-Platte, vorgenommen. Auch die Fixierung der Lage von Hot Spots, die eine Art Fixpunkt mit Bezug auf den Erdmantel darstellen, ist möglich. Grundsätzlich sei aber angemerkt, dass selbstverständlich auch Messungen, die sich auf globale Bezugssysteme wie das ITRF beziehen, zu interpretierbaren Ergebnissen bzgl. der Plattenrotationen führen. Die Fixierung einer Platte erscheint im Zeitalter von GPS nur noch bedingt erforderlich, kann aber gleichwohl zu Interpretationszwecken sinnvoll sein⁸.

Die Starrkörpermodelle können mit Hilfe zweier Arten von Datensätzen berechnet werden. Vielen der globalen Modelle, die zwischen Ende der 70er und Mitte der 90er Jahre entwickelt wurden, liegen geologische und geophysikalische Daten zu Grunde. In das kinematische Plattenmodell NUVEL-1A flossen beispielsweise 277 Spreizungsraten, 121 Azimute an Transform-Verwerfungen sowie 724 Azi-

⁸ siehe auch HEIDBACH [2000], GEISS [1987], SCHÜLER [2002, Kapitel 5]

mute an Erdbebenherdflächen ein⁹. Auf der anderen Seite bieten geodätische Messungen, vorzugsweise mit Raumverfahren (SLR, VLBI und GPS) ebenfalls die Möglichkeit, derartige Modelle abzuleiten. Eine Realisierung ist das sog. APKIM (*Allgemeines Plattenkinematisches Modell*¹⁰), das regelmäßig aktualisiert wird. Tabelle 4.2 stellt die aktuelle Version von APKIM den Parametern von NUVEL-1A in der NNR-Version (*No Net Rotation*) gegenüber.

Der wesentliche Unterschied zwischen einem aus geologischen bzw. geophysikalischen Daten und einem aus geodätischen Messungen abgeleiteten Plattenmodell besteht in den unterschiedlichen Zeitskalen: Im ersten Fall handelt es sich um Beobachtungen, die sich auf ein Zeitfenster von ca. 3 Mio. Jahren beziehen, während im zweiten Fall lediglich ein - in geologischen Größenordnungen betrachtet - infinitesimal kleines Zeitfenster betrachtet wird.

Plattentektonische Modelle wie das beschriebene Starrkörpermodell sollten nicht zur Bestimmung von Geschwindigkeitsvektoren für Orte an den Plattengrenzen verwendet werden, da in jenen Gebieten häufig Deformationen zu beobachten sind, die von der Bewegung einer starren Platte abweichen. In diesem Übergangsbereich kann die Kontinuum-Mechanik, bspw. in Form einer elastischen Modellierung weiterhelfen. Als unabhängiger Methode sind diesem Ansatz jedoch auf Grund mangelnder Kenntnis der nötigen Elastizitätsparameter Grenzen gesetzt¹¹. Es sei betont, dass eine Modellierung eventueller Bewegungen in radialer Richtung durch plattenkinematische Modelle nicht vorgenommen wird.

4.2.1.3.2 Finite Dreieckselemente

Der Vorteil des plattenkinematischen Ansatzes liegt in der vergleichsweise geringen Datenmenge, die zur Ableitung der Modellparameter erforderlich ist. Liegt ein ausreichend dichtes Netz an Referenzstationen vor, so können Interpolationsansätze zum Einsatz kommen, die auch in der Lage sind, kontinuumsmechanische Effekte innerhalb bestimmter Grenzen zu kompensieren.

Plate	APKIM 2002			NNR NUVEL-1A		
	Latitude [°]	Longitude [°]	Velocity [°/Ma]	Latitude [°]	Longit. [°]	Velocity [°/Ma]
AFRC	51.61 ± 0.52	276.60 ± 1.22	0.2906 ± 0.0025	50.57	286.04	0.2909
ANTA	62.73 ± 1.23	237.54 ± 2.04	0.2390 ± 0.0100	62.99	244.24	0.2383
ARAB	29.38 ± 56.7	277.58 ± 61.1	0.4146 ± 0.1997	45.23	355.54	0.5455
AUST	33.69 ± 0.25	36.90 ± 0.43	0.6300 ± 0.0023	33.85	33.17	0.6461
CARB	45.21 ± 2.08	246.56 ± 10.5	0.2008 ± 0.0211	25.01	266.99	0.2143
EURA	56.53 ± 0.50	261.52 ± 0.71	0.2726 ± 0.0018	50.62	247.73	0.2337
NAZC	46.21 ± 1.67	260.97 ± 0.60	0.6526 ± 0.0123	47.80	259.87	0.7432
NOAM	-1.55 ± 0.77	277.41 ± 0.35	0.1957 ± 0.0021	-2.43	274.10	0.2069
PCFC	-64.30 ± 0.18	105.52 ± 1.15	0.6588 ± 0.0029	-63.05	107.33	0.6409
SOAM	-10.74 ± 1.59	239.63 ± 4.34	0.1094 ± 0.0028	-25.35	235.58	0.1164
ASIA	59.61 ± 2.30	253.51 ± 3.81	0.3257 ± 0.0040	50.62	247.73	0.2337
SOML	53.65 ± 3.91	270.34 ± 7.25	0.3273 ± 0.0204	50.57	286.04	0.2909
Block						
ADRI	59.15 ± 4.60	282.66 ± 16.8	0.3350 ± 0.0340	50.62	247.73	0.2337
AGEA	49.62 ± 11.0	47.53 ± 39.4	0.3874 ± 0.4798	50.62	247.73	0.2337
ANAT	39.76 ± 0.18	28.80 ± 0.30	2.2508 ± 0.1323	50.62	247.73	0.2337
ANDE	4.15 ± 2.21	268.57 ± 2.09	0.3551 ± 0.0311	-25.35	235.58	0.1164
CALI	-32.19 ± 14.6	263.92 ± 5.43	0.1881 ± 0.0104	-2.43	274.10	0.2069
JAPN	-36.28 ± 0.26	312.40 ± 0.66	0.8502 ± 0.0761	50.62	247.73	0.2337
Technique						
SLR	64.08 ± 5.59	275.43 ± 9.84	0.0082 ± 0.0018			
VLBI	63.58 ± 24.3	330.10 ± 21.4	0.0211 ± 0.0014			
DORI	16.33 ± 19.9	285.33 ± 15.3	0.0277 ± 0.0053			

Tabelle 4.2: Allgemeines Plattenkinematisches Modell APKIM 2002 aus geodätischen Daten und NUVEL-1A aus geophysikalischen Daten. Beim APKIM ist die Eurasische Platte in Europa und Asien unterteilt. Angegeben sind für beide Modelle die geografische Lage des Rotationspoles (ϕ, λ) sowie die Rotationsgeschwindigkeit (ω). Quelle: DGFI [2003].

⁹ siehe DEMETS et al. [1990]

¹⁰ siehe DREWES [1998]

¹¹ vgl. mit GEISS [1987] sowie HEIDBACH [1999]

Der hier vorgestellte Ansatz basiert auf der sog. »Strain-Analyse« (Verzerrungsanalyse) und nutzt eine Vermaschung der vorhandenen Stationen zu finiten Dreieckselementen. Nach einem Zeitabschnitt Δt wird sich das in Abbildung 4.4 dargestellte Dreieck ABC in die Figur $A'B'C'$ verformen. Wären die Bewegungsvektoren \underline{v} für alle drei Punkte identisch, so bliebe das Dreieck $A'B'C'$ im Vergleich zu ABC kongruent. Bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten kommt es zu einer Verzerrung des Dreiecks (engl. *Strain*), so dass zwischen den beiden Figuren eine affine Beziehung besteht. Der Berechnungsansatz lautet demnach¹²

$$\begin{aligned} v_N &= \varepsilon_{NN} \cdot N + \varepsilon_{NE} \cdot E + \omega \cdot E + t_N \\ v_E &= \varepsilon_{NE} \cdot N + \varepsilon_{EE} \cdot E - \omega \cdot N + t_E \end{aligned} \quad (4.6)$$

mit den Koordinaten N (Nord- bzw. Hochwert) und E (Ost- bzw. Rechtswert), den Translationen t_N und t_E , der Rotation ω und den Verzerrungsgrößen (*Strain-Parameter*) ε_{NN} , ε_{EE} sowie ε_{NE} , auf deren Bedeutung bzw. Interpretation an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden soll¹³. An Stelle der Dislokationen $\underline{v} \cdot \Delta t$ werden - ohne Einschränkung der Gültigkeit der Formel - unmittelbar die Punktgeschwindigkeiten verwendet. Das Dreieck als finites Element ermöglicht somit unter Verwendung der drei (horizontalen) Geschwindigkeitsvektoren der Eckpunkte die (nicht überbestimmte) Berechnung der unbekannten Affin-Parameter.

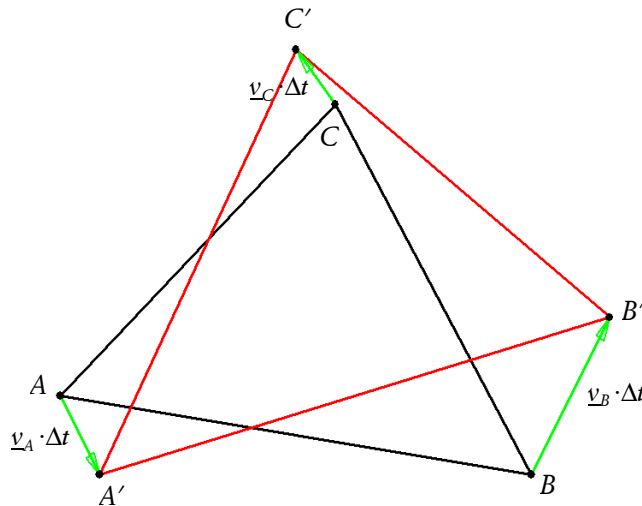


Abbildung 4.4: Finites Dreieckselement mit den Dislokationsvektoren und seiner neuen Gestalt zum Zeitpunkt $t_0 + \Delta t$.

Abbildung 4.5 zeigt die aus Messkampagnen abgeleiteten Geschwindigkeitsvektoren für Punkte im Bereich der Ägäis und der Türkei mit Bezug auf die Eurasische Platte (fixiert). Zusätzlich sind die Umrisse zweier bedeutsamer Blöcke eingezeichnet¹⁴, die nachfolgend als Mikroplatten betrachtet werden, um eine Vergleichsrechnung mit dem Starrkörper-Bewegungsansatz aus Abschnitt 4.2.1.3.1 durchführen zu können. Der westliche (und vom Modellierer relativ großzügig nach Osten ausgehende) Ägäische Block grenzt an den Anatolischen Block. Die Einteilung folgt im Wesentlichen der Darstellung von HEIDBACH [2000], aus dessen Arbeit auch die Daten entnommen wurden. Abbildung 4.6 zeigt die von TALKOVSKI [2004] vorgenommene Vermaschung des Netzes zu finiten Dreieckselementen, wobei die Elemente in diesem Fall auch die Blockgrenzen überspannen, was bei Vorhandensein von Diskontinuitäten nicht möglich bzw. sinnvoll wäre, die hier jedoch nicht ausgeprägt erscheinen.

¹² siehe WELSCH et al. [2000]

¹³ für weitere Details zur Verzerrungs-Analyse (*Strain Analysis*) siehe auch SCHÜLER [2002]

¹⁴ Darstellung folgt der Arbeit von TALKOVSKI [2004]

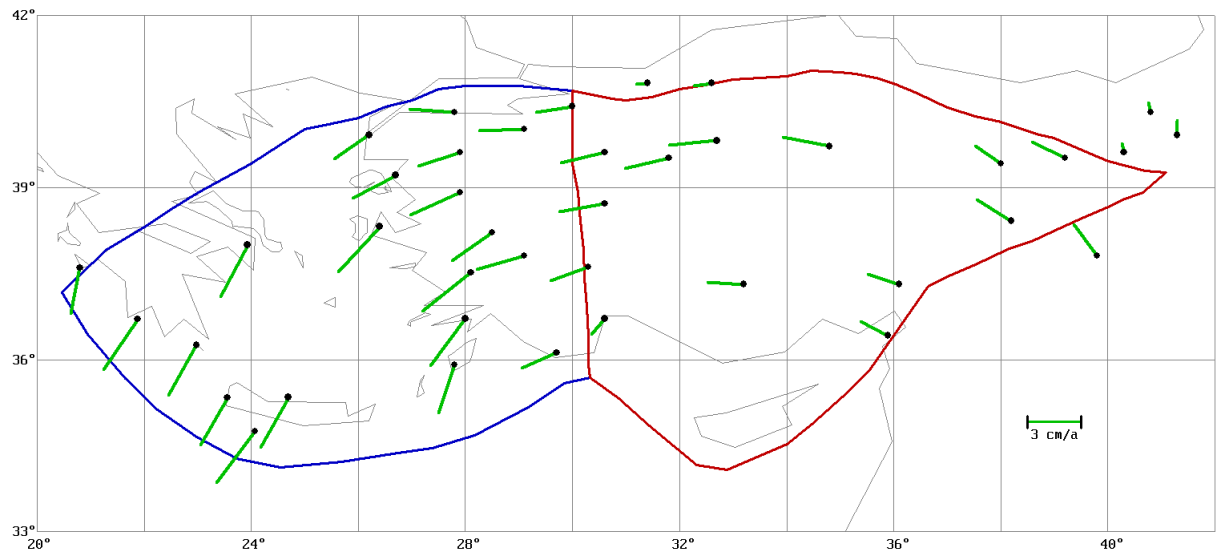


Abbildung 4.5: Punktfeld aus HEIDBACH [2000] zur Interpolation mit finiten Elementen.

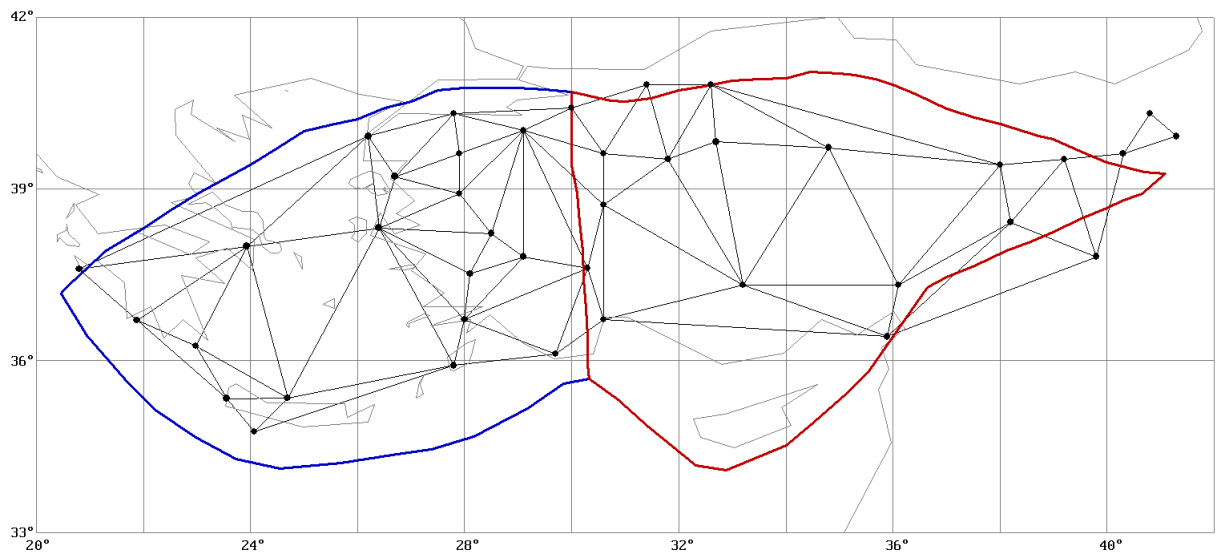


Abbildung 4.6: Vermaschung des Stützpunktfeldes zu finiten Dreieckselementen.

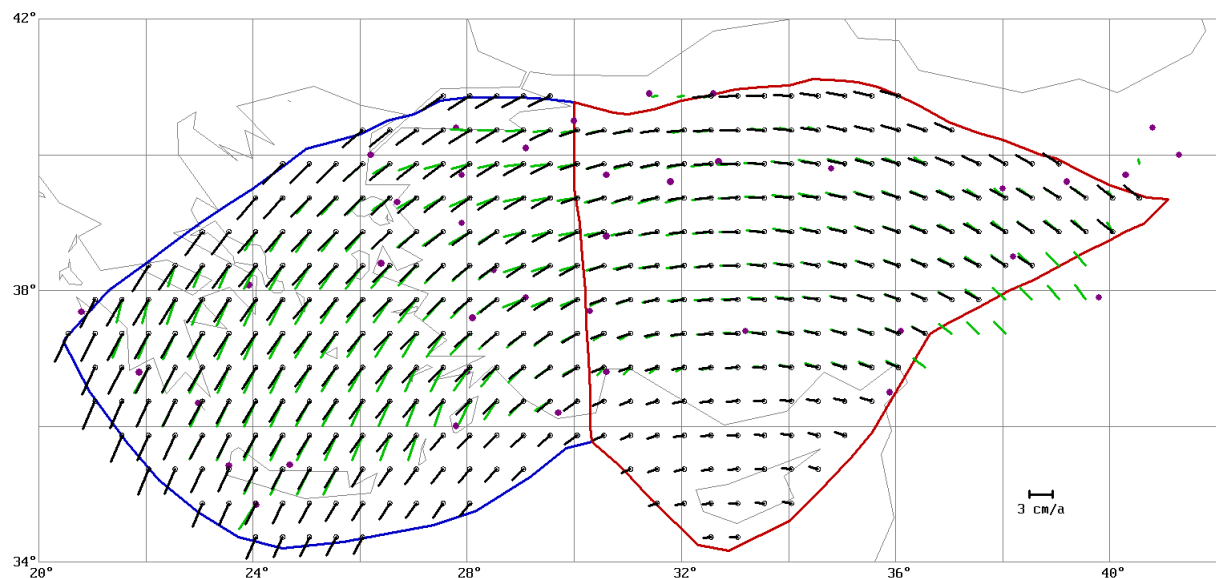


Abbildung 4.7: Interpolation über finite Elemente im Vergleich zur Starrkörperbewegung.

Das Vektorfeld der gitterförmig interpolierten Geschwindigkeitsvektoren findet sich in Abbildung 4.7. Die über eine Interpolation mit finiten Dreieckselementen abgeleiteten Vektoren sind in grüner Farbe dargestellt. Zusätzlich wurden die Modell-Parameter für die beiden Blöcke (Starrkörperbewegung) ermittelt und die daraus resultierenden Vektoren ebenfalls (in schwarzer Farbe) eingezeichnet. Für den größten Teil des Anatolischen Blocks kann eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den beiden Modellansätzen festgestellt werden. Größere Diskrepanzen treten im westlichen Block auf. Die Unterteilung dieses Gebietes in eine einzige Mikroplatte kann der Realität hier offensichtlich nicht in vollem Maße gerecht werden¹⁵. Eine Unterteilung in weitere Platten - wie sie beispielsweise in DEWEY et al. [1973] vorgeschlagen wird - dürfte zu einem höheren Grad an Übereinstimmung führen.

4.2.1.3.3 Höhenkomponente - postglaziale Landhebung

Die Prädiktion der radialen Geschwindigkeitskomponente gestaltet sich im Gegensatz zu den horizontalen Komponenten häufig schwierig. Wie bereits erwähnt wurde, wird bei der Starrkörperbewegung nach dem EULER-Ansatz keine Bewegung in Höhenrichtung einbezogen. Die Interpolation über finite Dreieckselemente wurde im vorhergehenden Abschnitt ebenfalls nur auf die horizontalen Geschwindigkeiten angewendet. Sie könnte theoretisch in räumliche Dimensionen ausgeweitet werden, doch darf über den Sinn einer solchen Maßnahme gestritten werden. Eine verhältnismäßig einfache Modellierung der vertikalen Koordinatenänderungen gelingt hingegen in den Gebieten, die während der Eiszeit von einer massiven Eisschicht bedeckt waren, also vor ca. 8.000 bis 10.000 Jahren, und sich nunmehr im Begriff einer nacheiszeitlichen Landhebung befinden. Wenn dieser Aufwölbungstrend die dominierende Bewegungskomponente darstellt, so können die Bewegungsraten vorhergesagt werden und als erster Anhalt für neu errichtete Referenzstationen dienen.

Die dynamische Antwort der Erde auf Be- und Entlastungsvorgänge ist eine Funktion der Flüssigkeitseigenschaften des Erdmantels. Das Anwachsen und Abschmelzen von Eisschilden geschieht dabei mit einer für geologische Zeitskalen sehr hohen Geschwindigkeit, so dass eine Betrachtung der dynamischen Effekte für das Verständnis des Erdmantelverhaltens mit Bezug auf die Oberflächenbelastung notwendig ist¹⁶. Die mächtige auf Grönland lastende Eisdecke hat die Erdoberfläche der Insel beispielsweise um mehrere Kilometer abgesenkt, so dass sie sich inzwischen teilweise sogar unterhalb der Meeresoberfläche befindet. Die Belastung durch die Eisschilde hat zu einer seitwärts gerichteten Fließbewegung des Mantelgesteins geführt, die der Erdoberfläche unter dem Eis die Absenkung gestattete.

In einer einfachen Form kann der Aufwölbungsbetrag w in radialer Richtung durch die Formel

$$w = w_M \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_R}\right) \quad \wedge \quad \tau_R = \frac{4\pi \cdot \mu}{\lambda \cdot \rho \cdot g} \quad (4.7)$$

dargestellt werden¹⁷, wobei unter w_M der maximale Depressionsbetrag durch die Eis- bzw. Schneemassen verstanden wird, t den Berechnungszeitpunkt charakterisiert, μ die Viskosität des Erdmantels, ρ die Dichte und g die Schwerebeschleunigung ist. Der Parameter λ legt die Wellenlänge der Eisschildstruktur fest. Dieser Ansatz repräsentiert ein isostatisches Modell, das eine Punktauflast und damit eine lokale Deformation der Lithosphäre in Verknüpfung mit einer Relaxation der Asthenosphäre berücksichtigt. Jene wird durch eine Zeitkonstante, die Relaxationszeit τ_R der nacheiszeitlichen Aufwölbung, ausgedrückt.

¹⁵ Gleichzeitig sei aber auch auf die geringe Stützpunktdichte und damit geringe Auflösung des Modells aus finiten Elementen im Ägäischen Meer hingewiesen, die in diesem Gebiet nicht mit der gewählten Auflösung des Interpolationsgitters korrespondiert. Dies kann schnell dazu führen, dass Restfehler in den Stützpunktdaten zu systematisch erscheinenden Abweichungen zwischen den beiden Ansätzen führen.

¹⁶ Im Gegensatz dazu vollzieht sich beispielsweise die Gebirgsbildung mit einer derart langsamen Geschwindigkeit, dass dynamische Effekte vollständig vernachlässigt werden können, d.h. es kann von einem hydrostatischen Gleichgewicht während des gesamten Lebenszyklus des Gebirges ausgegangen werden.

¹⁷ siehe TURCOTTE und SCHUBERT [1982], HEISKANEN und MORITZ [1993] oder SCHÜLER [2002]

GREVE [2000] vergleicht verschiedene Modelle zur Berechnung der postglazialen Aufwölbung und führt Rechnungen für den antarktischen Kontinent durch. Er kommt zu dem Schluss, dass ein kompliziertes und aufwändig zu implementierendes SGVE-Modell¹⁸ die höchste Genauigkeit aufweisen dürfte. Das hier vorgestellte LLRA-Modell¹⁹ liefert trotz seiner einfachen Struktur und Handhabung vergleichsweise gute Ergebnisse. Eine Verbesserung könnte noch durch eine Erweiterung um eine elastische Modellierung der Lithosphäre anstelle einer lokalen Modellierung erfolgen (ELRA-Modell²⁰). Eine generelle Genauigkeitsaussage ist indes nicht einfach, doch zeigt der Vergleich mit empirischen Aufwölbungsraten im skandinavischen Raum eine Übereinstimmung von häufig besser als 1,5 mm/a, allerdings treten an bestimmten kritischen Stationen maximale Abweichungen in der Größenordnung von bis zu 5 mm/a auf²¹.

Bei der Ableitung der benötigten Modellparameter kommt abgestuften Strandterrassen eine besondere Bedeutung zu, die sich in bestimmten Gebieten - bspw. an Inselküsten und Flussrändern - finden und eine höhenmäßige Quantifizierung der postglazialen Aufwölbung ermöglichen²². Im Bereich Fennoskandiens werden seit geraumer Zeit verstärkt GPS-Ergebnisse zum Monitoring der Landhebung eingesetzt²³. Die vertikalen Bewegungsraten lassen sich mit der zeitlichen Ableitung der Modellgleichung

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{w_M}{\tau_R} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_R}\right) \quad (4.8)$$

unmittelbar in Verbindung bringen und können so zur Verbesserung der Modelle beitragen.

4.2.2 Erweitertes Bewegungsmodell

Das einfache, lineare Bewegungsmodell aus Abschnitt 4.2.1 weist in der Praxis bei Verwendung im Zusammenhang mit ITRF und EUREF-Stationen eine Reihe von Unzulänglichkeiten auf. Zunächst wird der Einfluss des Luftdruckes auf die Höhenkomponente nicht berücksichtigt. Auftretende Luftdruckänderungen führen zu einer veränderten Deformation der Erdkruste und können damit grundsätzlich auch einen Einfluss auf die Position der Referenzstation haben. Weiterhin können in den Zeitreihen verschiedener Stationen Schwingungen mit einer Periodendauer von einem Jahr beobachtet werden, deren verschiedene Ursachen nachfolgend kurz angesprochen werden. Eine Erweiterung der bestehenden Bewegungsgleichung ist aus diesen Gründen sinnvoll.

4.2.2.1 Modellfunktion

Die erweiterte Modellfunktion wird nunmehr vorteilhaft im lokalen geodätischen Koordinatensystem mit dem Hochwert N , dem Rechtswert E und der Höhe h über dem Ellipsoid formuliert. Mit den Zusatztermen für die saisonalen Variationen und die Druckauflast ergibt sich

$$\begin{pmatrix} N \\ E \\ h \end{pmatrix}_{t_{BEOB}} = \begin{pmatrix} N \\ E \\ h \end{pmatrix}_{t_{REF}} + \begin{pmatrix} v_N \\ v_E \\ v_h \end{pmatrix} \cdot (t_{BEOB} - t_{REF}) + \begin{pmatrix} \Delta N \\ \Delta E \\ \Delta h \end{pmatrix}_{SAISON} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta h \end{pmatrix}_{LUFTDRUCK}, \quad (4.9)$$

wobei für die saisonalen Variationen eine Periodendauer von einem Jahr unterstellt wird (»jährliche Welle«)

¹⁸ SGVE = Self-Gravitating Viscoelastic Multi-Layer Model

¹⁹ LLRA = Local Lithosphere, Relaxing Asthenosphere

²⁰ ELRA = Elastic Lithosphere, Relaxing Asthenosphere

²¹ siehe KANIUTH und HUBER [2003]

²² siehe auch OKUNO und NAKADA [2001]

²³ siehe bspw. SCHERNECK et al. [2001] und MILNE et al. [2001]

$$\begin{pmatrix} \Delta N \\ \Delta E \\ \Delta h \end{pmatrix}_{SAISON} = \sin(2\pi \cdot t'_{BEOB}) \cdot \begin{pmatrix} s_N \\ s_E \\ s_h \end{pmatrix} + \cos(2\pi \cdot t'_{BEOB}) \cdot \begin{pmatrix} c_N \\ c_E \\ c_h \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

und t' der Bruchteil (Nachkommastellen) der Beobachtungsepoche in Jahren ist und s die Amplituden des Sinus- sowie c die Amplituden des Kosinus-Terms sind. Die resultierende Amplitude a und die Phasenverschiebung ϑ der Welle folgen bekanntlich aus

$$a_h = \sqrt{s_h^2 + c_h^2} \quad \wedge \quad \tan \vartheta_h = \frac{s_h}{c_h} \quad (4.11)$$

und werden hier exemplarisch nur für die radiale Koordinatenkomponente aufgeführt.

Der Einfluss des atmosphärischen Luftdrucks auf die Koordinatenänderungen wirkt signifikant nur in radialer Richtung. Die Modellbildung lehnt sich eng an das Vorgehen in der terrestrischen Gravimetrie an, siehe TORGE [1989] und wird in dieser Form auch von KANIUTH und HUBER [2003] verwendet:

$$\Delta h_{DRUCK} = \gamma_p \cdot \Delta p = \gamma_p \cdot (p_{BEOB} - p_{REF}) \quad , \quad (4.12)$$

Als Umrechnungsfaktor dient der Gradient γ_p ; weiterhin muss die Differenz zwischen dem tatsächlichen (beobachteten) und dem Referenzluftdruck bekannt sein. Diese Größe wird gelegentlich auch als *Luftdruckanomalie* bezeichnet. Der Referenzluftdruck folgt nach TORGE [1989] als Funktion der Höhe H über dem Meeresspiegel mit

$$p_{REF} = 1013,25 \text{ [hPa]} \cdot \left(1 - \frac{0,0065 \text{ [K/m]}}{288,15 \text{ [K]}} \cdot H \right)^{5,2559} \quad , \quad (4.13)$$

und ist zeitlich nicht variabel. Saisonale Periodizitäten und Druckauflasten wirken räumlich korrelierend und werden gelegentlich auch als *Common Mode Errors* (CME) bezeichnet. Es ist insofern prinzipiell möglich, diese Größen für Stationen zu interpolieren, die nur zeitweise in Betrieb sind (z.B. auf Messkampagnen).

4.2.2.2 Saisonale Variationen

Periodische Systematiken - vorzugsweise im Jahresrhythmus - können in vielen Zeitreihen von Permanentstationen identifiziert werden und beschränken sich nach CAMPBELL [2003] nicht zwingend nur auf die vertikale Koordinatenkomponente, sondern können auch in den Horizontalkoordinaten reflektiert werden, zumeist allerdings mit geringerer Amplitude. POUTANEN u.a. [2003] nennen als Hauptgründe atmosphärische Druckänderungen, die Schneebedeckung, Bodenfeuchte und Variationen in den ozeanischen Wassermassen als Ursachen. Auch Restfehler in der Kompensation der troposphärischen Laufzeitverzögerungen dürften als Gründe in Frage kommen, da die feuchte Komponente in Europa auf Grund höherer Temperaturen maximale Amplituden in den Sommermonaten erlangt und somit eine saisonale Abhängigkeit gegeben ist. DONG [2003] quantifiziert die Einflussfaktoren wie in Tabelle 4.3 gegeben.

Neben wichtigen Faktoren wie der Bodenfeuchte wird auf die Differenzen zwischen verschiedenen Auswertepaketen hingewiesen. Die Modellierung der Daten macht also eine wichtige Quelle für saisonale Signaturen in den Ergebnissen aus. Beispielhaft sei die Wahl der Elevationsmaske genannt, die in den letzten Jahren von einigen Analysezentren von anfänglich 15° immer weiter reduziert wurde. Dadurch wirken troposphärische Restfehler jedoch stärker auf die Koordinaten, bspw. wegen möglicher azimuthaler Asymmetrien.

Die in Abschnitt 4.1.2 erwähnten EUREF Wochenlösungen können zur Zeitreihenanalyse benutzt werden. Hierfür wurde der Zeitabschnitt ab GPS Woche 1143 bis einschließlich 1280 gewählt²⁴ und

²⁴ Die GPS Woche 1143 markiert den Zeitpunkt der Umstellung auf das ITRF2000.

eine Zeitreihenanalyse unter Nutzung des erweiterten Bewegungsmodells durchgeführt. Zu den zusätzlichen Schätzparametern zählten neben den jeweils drei saisonalen Sinus- und Kosinuskoeffizienten auch die atmosphärischen Druckauflastgradienten γ_p , die erst im nachfolgenden Abschnitt diskutiert werden. Abbildung 4.8 gibt die resultierende Amplitude der Jahreswelle für die vertikale Komponente in Abhängigkeit von der geografischen Breite der Station wieder. Eine Korrelation zwischen den beiden Größen kann dabei nicht festgestellt werden.

Ein Blick auf Tabelle 4.4 verdeutlicht, dass die Schwingungen in den horizontalen Koordinatenkomponenten in aller Regel mit wenigen Millimetern nur schwach ausgeprägt sind und die Vertikal-komponente um den Faktor ≥ 4 stärker ausfällt. Die Mehrzahl der in der Tabelle aufgeführten Stationen zeigt Amplituden zwischen 7 und 9 mm, die Station MALL auf der Insel Mallorca liegt mit 11 mm etwas darüber und ZECK mit fast 14 mm markiert die Obergrenze²⁵. Die in Deutschland befindlichen Stationen zeigen - zumindest im Radialkanal - deutliche räumliche Korrelationen in den Amplituden, d.h. eine Interpolation dieser Koeffizienten auf die Orte von Neupunkten erscheint möglich, so dass diese *Common Mode Errors (CME)* regional eher unproblematisch sind.

4.2.2.3 Atmosphärische Druckauflasten

Die Koordinatenänderungen auf Grund atmosphärischer Luftdruckvariationen können mit dem in Abschnitt 4.2.2.1 beschriebenen Ansatz als Punktauflast in bestimmtem Umfang modelliert werden. Die zur Berechnung erforderlichen Druckdaten wurden aus dem Wettermodell NOAA NCEP GDAS FNL stationsspezifisch extrahiert²⁶. Die Ausgabefelder dieses Modells besitzen horizontal eine Auflösung von $1^\circ \times 1^\circ$ und vertikal 26 Höhen- und Temperaturschichten (bis 10 hPa) sowie 21 Feuchteschichten (bis 100 hPa). Die zeitliche Auflösung beträgt nominell 3 h, wobei alle 6 h eine Analyse durchgeführt und dazwischen zusätzlich eine 3-h-Kurzzeitvorhersage genutzt wird. Aus diesen Daten konnten die Tages- bzw. Wochenmittelwerte berechnet werden, die anschließend in Druckanomalien umgerechnet wurden und als solche Eingang in die Berechnungen fanden.

In Abbildung 4.9 wurden die signifikanten Druckauflastkoeffizienten γ_p in Abhängigkeit von der geografischen Breite aufgetragen. Zunächst fällt - auch unter Betrachtung von Tabelle 4.4 - auf, dass die Auflastgradienten für viele Stationen nicht mit ausreichender statistischer Signifikanz bestimmt werden konnten. Gleichzeitig scheint tendenziell eine Zunahme des Gradienten für Stationen im südlichen Bereich vorzuherrschen. Allerdings genügt die geringe Stationszahl nicht für eine Verifika-

<i>Einflussfaktor/Ursache</i>	<i>Abschätzung der Auswirkung</i>
<i>Poltide</i>	4 mm
<i>ozeanische Gezeiten</i>	0,1 mm
<i>ozeanische Auflast (keine Gezeiten)</i>	2 bis 3 mm
<i>atmosphärische Auflast</i>	4 mm
<i>Schneemassen</i>	3 bis 5 mm
<i>Bodenfeuchte</i>	2 bis 7 mm
<i>thermale Ausdehnung des Bodengesteins</i>	0,5 mm
<i>Satellitenorbits, Restfehler</i>	noch nicht quantifiziert
<i>Phasenzentrumskorrektur, Restfehler</i>	noch nicht quantifiziert
<i>Troposphäre, Restfehler</i>	noch nicht quantifiziert
<i>Netzausgleichung, Unzulänglichkeiten</i>	0,7 mm
<i>Differenzen zwischen verschiedener Auswertesoftware</i>	2 bis 3 mm; an bestimmten Stationen auch 5 bis 7 mm

Tabelle 4.3: Ursachen für saisonale Variationen in den Zeitreihen von GPS-Koordinaten und ihre Größenordnung nach DONG [2003].

²⁵ Die Station TRAB übertrifft ZECK mit 14,6 mm ein wenig; Station NSSP zeigt zwar noch eine höhere Amplitude, doch beginnt deren Zeitreihe effektiv erst in GPS Woche 1209 und weist daher einen deutlich reduzierten Datenumfang auf.

²⁶ Details finden sich in SCHÜLER [2001] sowie SCHÜLER, HEIN, EISSFELLER [2001]

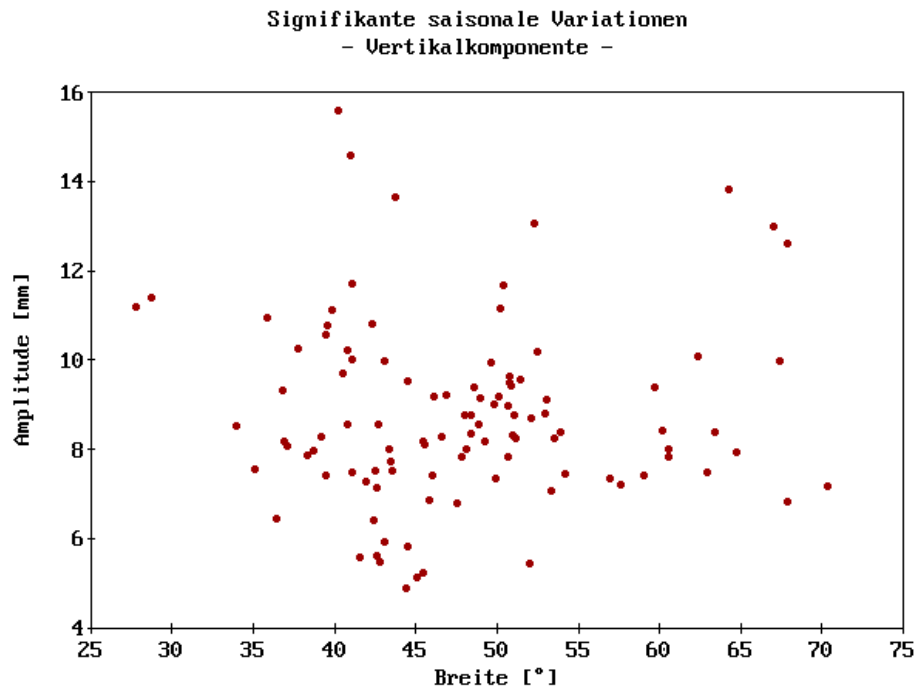


Abbildung 4.8: Darstellung der saisonalen Amplituden a_h in radialer Richtung mit jährlicher Periodendauer für das EUREF Netzwerk.

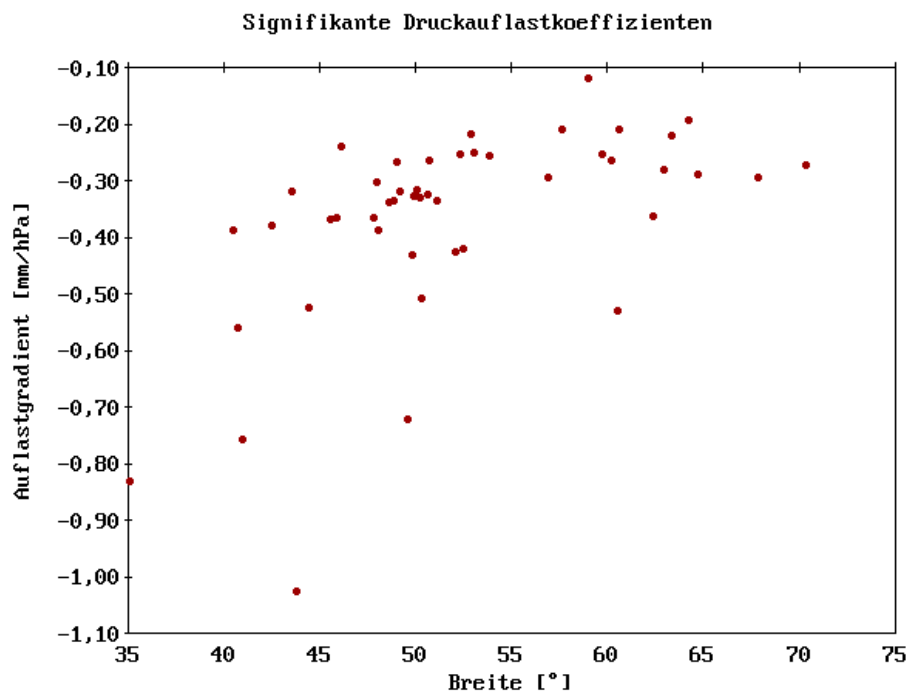


Abbildung 4.9: Darstellung der Druckauflastkoeffizienten γ_p für Stationen des EUREF Netzwerkes; insignifikante Parameter wurden nicht in das Diagramm aufgenommen.

tion dieser Interpretation. Typische Auflastkoeffizienten liegen für die Stationen in Deutschland zwischen -0,1 und -0,4 mm/hPa. Alle Gradienten weisen ein negatives Vorzeichen auf, auch wenn für einige Stationen auch positive Werte bestimmt wurden, die jedoch in keinem Fall statistisch signifikant waren. Tabellen für die signifikanten saisonalen Variationen und die Druckauflastkoeffizienten im EUREF Netzwerk finden sich im Anhang (Kapitel 9).

Station	a_N	σ_a	a_E	σ_a	a_h	σ_a	γ_P	σ_γ
OBE2	1,0	0,3	0,6	0,2	8,0	1,2	-0,39	0,12
ZIMM	1,2	0,2	0,5	0,2	9,2	1,0	-0,20	0,12
KARL	1,4	0,3	1,4	0,2	9,1	1,3	-0,27	0,13
EUSK	0,7	0,2	0,3	0,1	9,0	0,8	-0,33	0,07
DRES	0,4	0,4	2,4	0,3	8,8	1,7	-0,10	0,16
ALAC	0,5	0,2	0,5	0,2	7,9	1,2	-0,20	0,14
EBRE	2,4	0,3	2,4	0,2	8,6	1,4	-0,27	0,18
BELL	1,3	0,2	1,0	0,2	5,6	1,2	-0,19	0,15
MALL	0,3	0,2	1,3	0,2	11,1	1,0	-0,07	0,38
LAMA	0,5	0,2	0,5	0,2	8,4	1,0	-0,26	0,08
RIGA	0,5	0,3	0,3	0,2	7,3	1,5	-0,29	0,11
ZECK	2,1	0,4	1,8	0,3	13,7	1,8	-1,03	0,35

Tabelle 4.4: Amplituden a der jährlichen Schwingung sowie Druckauflastkoeffizienten γ für ausgewählte Stationen des EUREF Netzwerkes, abgeleitet unter Nutzung der EUREF Wochenlösungen über den Zeitraum von GPS Woche 1143 bis 1280. Ausgegraute Werte wurden als statistisch nicht signifikant identifiziert. Einheiten: Amplituden in [mm], Druckauflastgradienten in [mm/hPa].

4.2.3 Koordinatensprünge

Ein wesentlicher Aspekt wurde bisher nicht angesprochen: Diskontinuitäten in den Zeitreihen. Sie können durch eine Reihe von Einflüssen ausgelöst werden. Eine der häufigsten Ursachen dürften Veränderungen an Antenne oder Empfänger (Auswechselung) oder deren Versetzung mit nicht ausreichend genauer Bestimmung der neuen Exzentrizitäten sein. Änderungen in der Empfänger-Firmware können ebenfalls nachweislich einen Einfluss auf die Homogenität der Zeitreihen haben²⁷, auch wenn sie sich nicht zwingend in abrupten Sprungeffekten äußern müssen. Eine wichtige Ursache kann weiterhin in natürlichen Phänomenen, im Wesentlichen Erdbeben, gesehen werden.

4.2.3.1 Erweiterung der Modellfunktion

Die Berücksichtigung von Sprüngen kann durch die Einbeziehung von Koordinatendifferenzen geschehen, die zur Überbrückung der aufgetretenen Diskontinuitäten dienen und im Rahmen der Zeitreihenanalyse als Zusatzparameter mitgeschätzt werden. Die Bewegungsgleichung lautet dann

$$\begin{pmatrix} N \\ E \\ h \end{pmatrix}_{t_{BEOB}} = \begin{pmatrix} N \\ E \\ h \end{pmatrix}_{t_{REF}} + \sum_{i=1}^n \begin{pmatrix} \Delta N \\ \Delta E \\ \Delta h \end{pmatrix}_i + \begin{pmatrix} v_N \\ v_E \\ v_h \end{pmatrix} \cdot (t_{BEOB} - t_{REF}) + \begin{pmatrix} \Delta N \\ \Delta E \\ \Delta h \end{pmatrix}_{SAISON} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta h \end{pmatrix}_{LUFTDRUCK}, \quad (4.14)$$

wobei die Summe der Koordinatendifferenzen bis zum Index n läuft und alle bis einschließlich zum Zeitpunkt t_{BEOB} aufgetretenen Sprünge berücksichtigt. Diese Gleichung besitzt nur dann Gültigkeit, wenn nach dem Auftreten der Diskontinuität weiterhin von einem identischen Bewegungsvektor ausgegangen werden darf.

4.2.3.2 Einfluss von Erdbeben

Es liegt nahe, dass in der Nähe von GPS Permanentstationen auftretende seismische Ereignisse Signaturen in den Positionszeitreihen hinterlassen werden. Nicht nur während des Erdbebens treten Verschiebungen auf, sondern auch in den ersten Wochen nach dem Hauptereignis kommt es auf Grund von Relaxationsphänomenen zu (nicht zwingend linearen) Veränderungen, für die sich Geo-Wissenschaftler interessieren. Ein typisches Fallbeispiel, das allerdings auch in besonderem Maße zur Vorsicht bei der Interpretation der Daten mahnt, ist die IGS Station Manzanillo (MANZ) in Mexiko, die an einem Hafen aufgebaut ist und gleichzeitig eine Verknüpfung mit einem Pegel herstellt.

²⁷ siehe TREGONING et al. [2003]

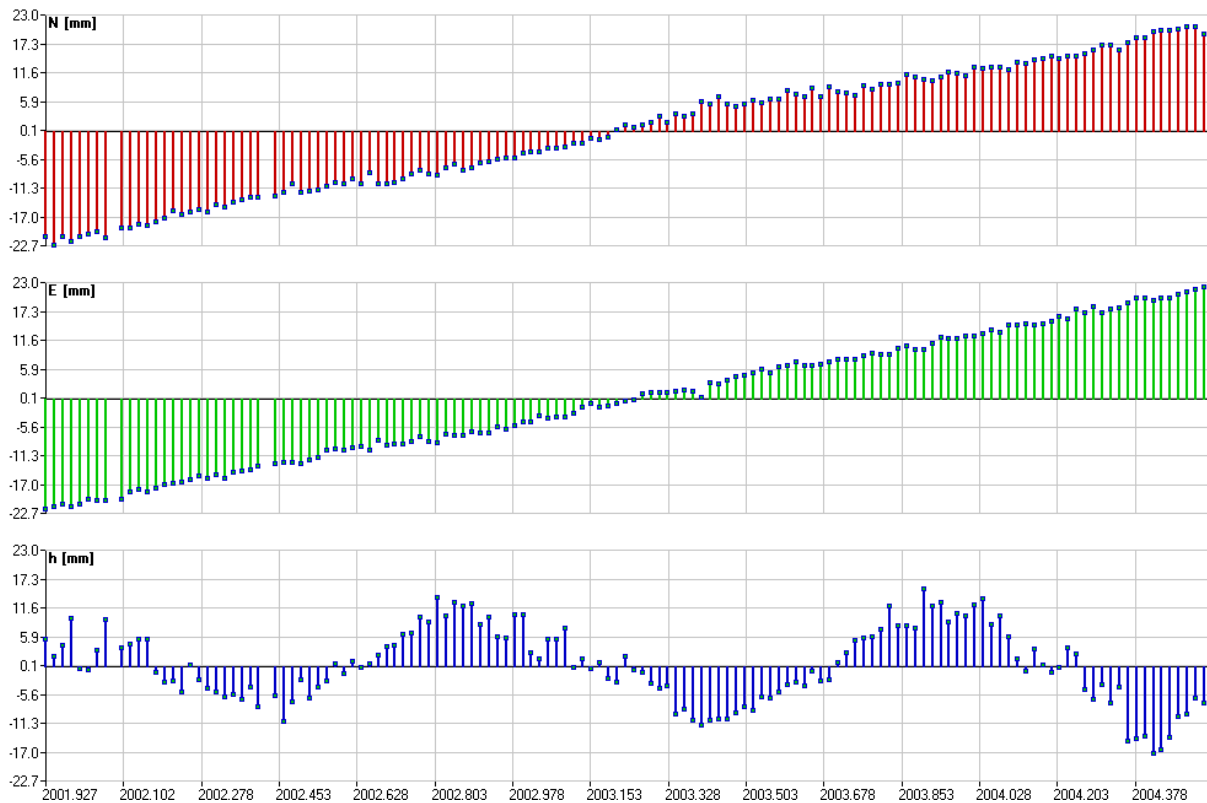


Abbildung 4.10: Positionszeitreihe für die EUREF Station Euskirchen (EUSK), aus der die saisonalen Koeffizienten und der Druckauflastkoeffizient abgeleitet wurden. Die jährliche Welle in der Vertikalkomponente kann deutlich erkannt werden.

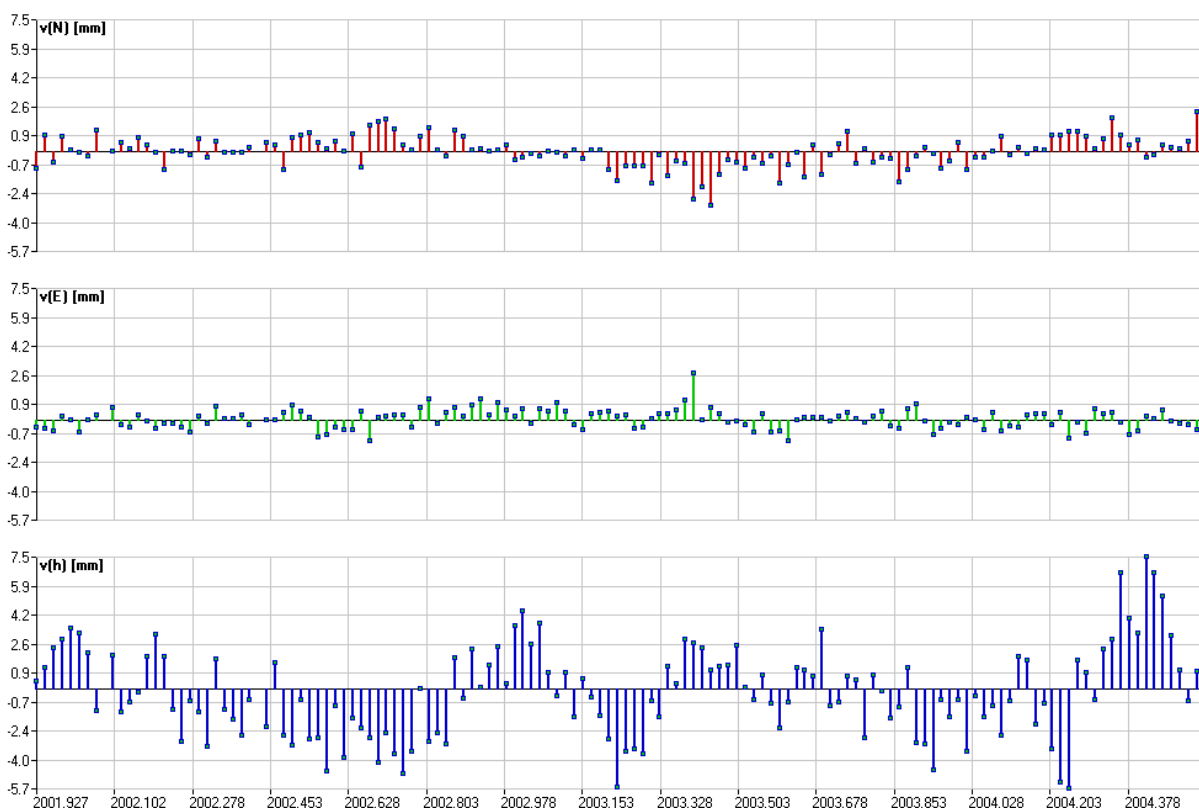


Abbildung 4.11: Nach der Zeitreihenanalyse verbleibende Verbesserungen. Es wird deutlich, dass die größten Unsicherheiten den Radialkanal betreffen und trotz Abspaltung einer Jahresschwingung weiterhin deutliche Systematiken verbleiben.

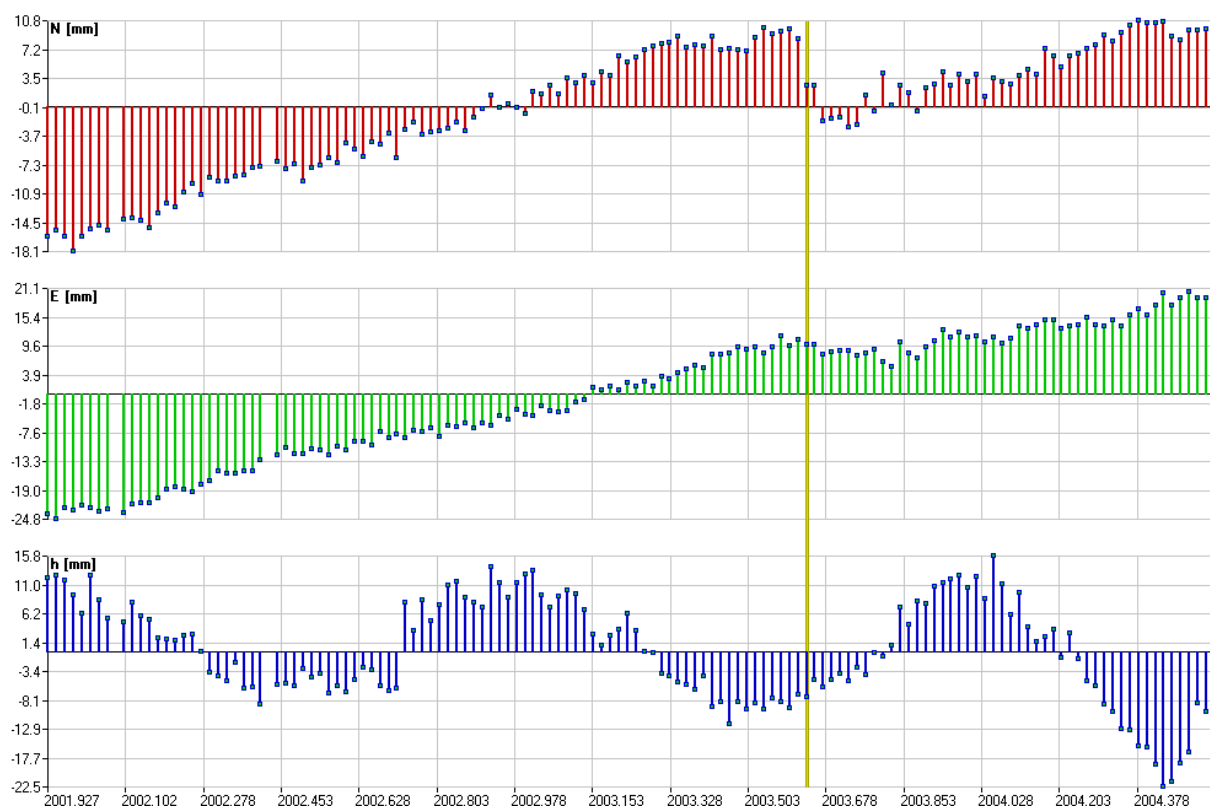


Abbildung 4.12: Koordinatenzeitreihe für die EUREF Station Mallorca (MALL) mit einem deutlich sichtbaren Sprung in der Nordkomponente zur GPS Woche 1232.

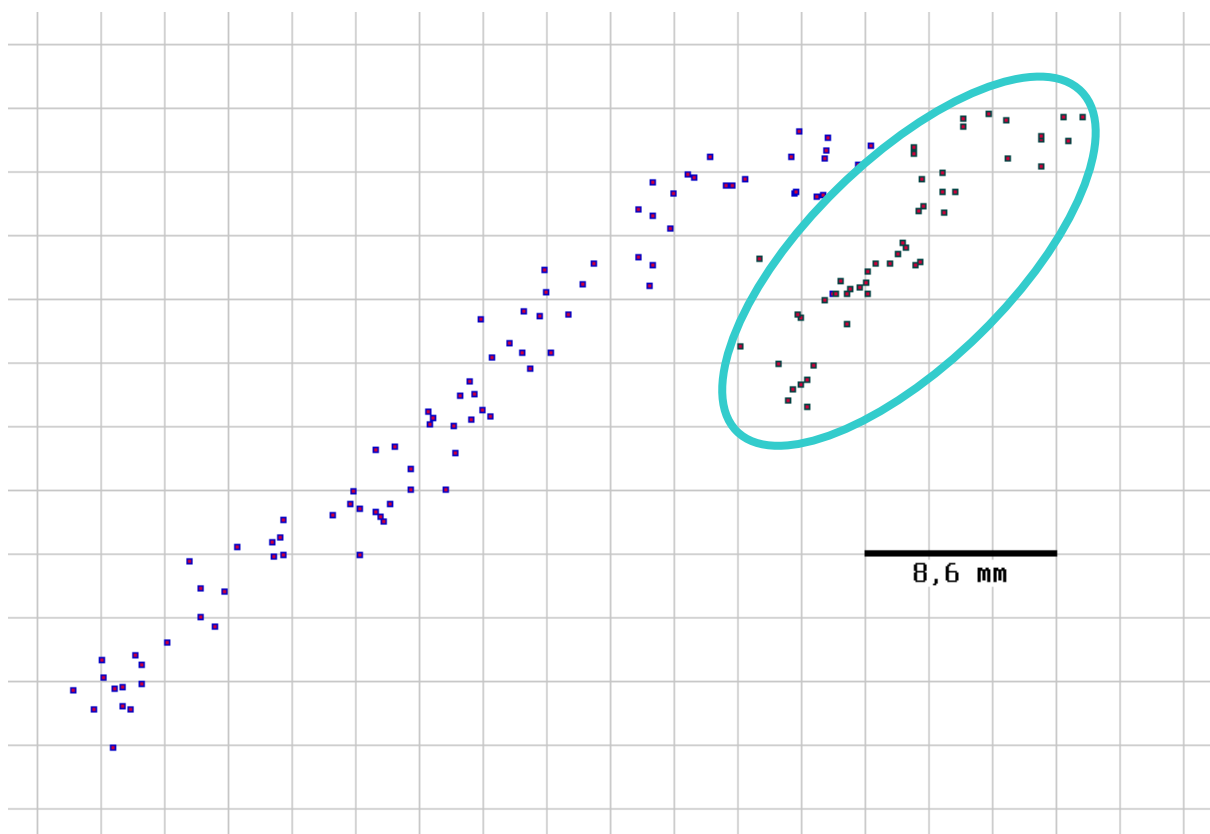


Abbildung 4.13: Darstellung der Horizontalpositionen für die Station Mallorca (MALL) mit dem markanten Koordinatensprung; die im Anschluss aufgebaute Zeitreihe wurde durch eine Ellipse markiert.

Abbildung 4.14 gibt Aufschluss über die rege Erdbebenaktivität in diesem Gebiet, in dem die Nordamerikanische und die Cocos Platte aneinandergrenzen. Abbildung 4.15 zeigt die berechneten Tageslösungen, die einer Kalman-Filterung mit angeschlossener freier Netzlösung über die IGS Stationen PIE1, MDO1 und NLIB entstammt. Erdbeben traten nahe der Pegelstation am 05.11. und 15.11.2002 sowie am 22.01. und 04.02.2003 auf. Zwei Koordinatensprünge treten deutlich in Erscheinung, nämlich am 16.11.2002 und am 22.01.2003, die offenkundig exakt mit den seismischen Ereignissen am 15.11.2002²⁸ bzw.

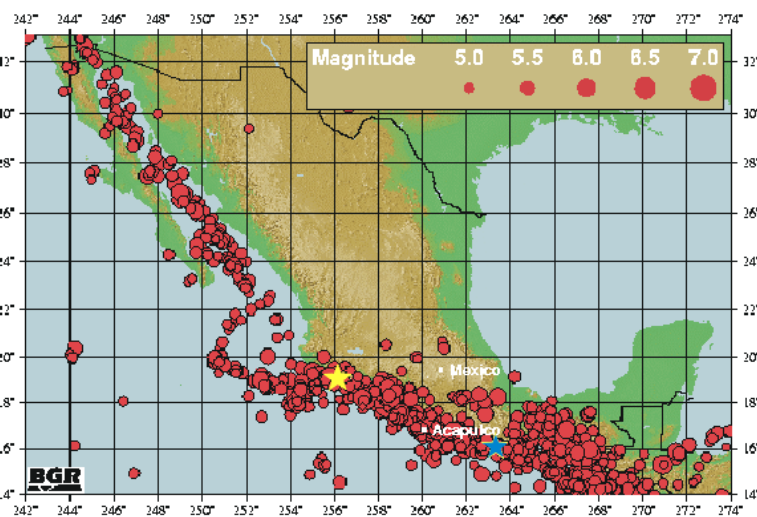


Abbildung 4.14: Erdbebenaktivität im Bereich der IGS Station Manzanillo (MANZ), die sich leicht westlich des eingezeichneten Epizentrums (gelber Stern) befindet.²⁹

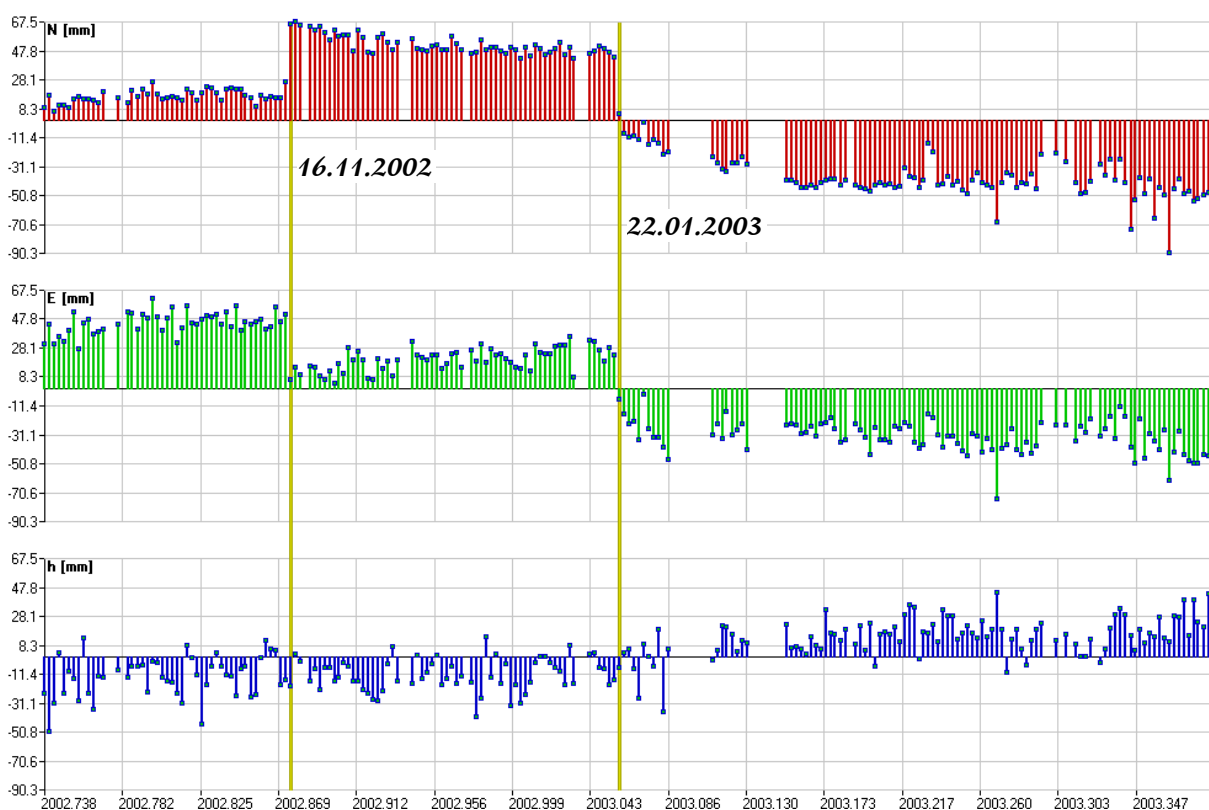


Abbildung 4.15: Darstellung der Entwicklung der Punktkoordinaten der IGS-Station MANZ im interessierenden Zeitraum. Die Zeitpunkte mit markanten Koordinatensprüngen wurden markiert.

22.01.2003 übereinstimmen. In der Tat wird in DGFI [2003, S. 56f] unkritisch davon ausgegangen, dass die Koordinatenveränderungen durch die Erdbeben im November 2002 bzw. Januar/Februar 2003 verursacht worden seien. Dieser Ansicht muss jedoch klar widersprochen werden. Zwar darf der

²⁸ Die Tageslösung nutzt einen Filter, der die mittlere Tageskoordinate über die Zeitspanne bis ausschließlich zum Auftreten eines signifikanten Sprunges ermitteln kann, so dass abrupte Ereignisse unter Umständen erst in der nachfolgenden Tageslösung in Erscheinung treten können.

²⁹ Quelle: SDAC, Hannover, http://sdac.hannover.bgr.de/web/sdac/big_quakes/mexico_030122_deu.html (Aug. 2004)

Koordinatensprung am 22.01.2003 in einen Zusammenhang mit dem entsprechenden Erdbeben gestellt werden³⁰, da in der Zeit zwischen November 2003 und dem Ereignis im Januar 2003 keinerlei Änderungen an der Station vorgenommen wurden. Das seismische Ereignis am 15.11.2002 hingegen kann auf keinen Fall sicher von einem »anthropogenen« Ereignis getrennt werden: Im Laufe des 15.11.2003 kollidierte ein Boot mit der Hafenmauer in unmittelbarer Nähe des GPS Monuments und führte zu einer deutlichen Versetzung der Antenne³¹.

4.3 Abschließende Bemerkungen

Die in diesem Kapitel gemachten Ausführungen unterstreichen die Bedeutung eines präzisen Referenzsystems sowie genauer Koordinaten der Referenzstationen. In diesem Zusammenhang wurde weiterhin aufgezeigt, dass die Modellierung der Koordinatenzeitreihen zum Zwecke der Prädiktion der Referenzstations-Positionen in die Zukunft nicht als unproblematisch bezeichnet werden kann. Die in Abbildung 4.11 aufgetragenen Verbesserungen der Zeitreihe für die Station Euskirchen (EUSK) weisen auch nach Ansetzung des erweiterten Bewegungsmodells - zumindest in vertikaler Richtung - noch deutliche Systematiken auf. Eine Reduktion dieser Restfehler könnte bspw. durch präzisere Modelle für die Bodenfeuchte und andere hydrologische Vorgänge (z. B. Grundwasserspiegeländerungen) erreicht werden und lässt noch Betätigungsfelder für zukünftige Forschungsaktivitäten.

Die Bestimmung von à priori Bewegungsraten für Neupunkte aus geodynamischen Modellen kann mit den in Abschnitt 4.2.1.3 angesprochenen Ansätzen erfolgen, aber die Genauigkeit der Modelle kann regional recht variabel sein. In bestimmten Gebieten könnte die Anwendung auch zu stark verfälschten Werten führen. Ein Beispiel sind die Azoren, die als Kontaktzone zwischen der Eurasischen, Afrikanischen und Nordamerikanischen Platte bekannt sind. Bereits die korrekte Zuordnung eines Neupunktes zu einer der drei Platten dürfte im Einzelfall nicht unkritisch sein. Aus diesem Grunde können geodynamische Modelle für hochpräzise Aufgaben nur einen Anhaltswert liefern.

Diskontinuitäten stellen ein weiteres Problem dar. Plastische Prozesse in Form von Erdbeben treten unter Umständen an Stationen auf und führen zu Koordinatensprüngen. Zusätzlich können viskose Relaxationsprozesse nach einem Beben die mittlere tektonische Großbewegung überlagern und einen nicht-linearen Bewegungscharakter aufweisen, d.h. der in der Bewegungsgleichung angesetzte Geschwindigkeitsvektor verliert für diese Zeitspanne seine Gültigkeit.

Als Konsequenz aus den angesprochenen Problemen ergibt sich die Notwendigkeit, für ein modernes Bezugssystem auch eine laufende Instandhaltung durchzuführen. Wie am Beispiel des EUREF gezeigt, erfolgt eine kontinuierliche Aufdatierung durch permanentes Monitoring und die Bereitstellung von Wochenlösungen. Auf diese Weise können die angesprochenen Probleme in großen Teilen kompensiert werden.

³⁰ persönlicher E-Mail-Kontakt mit J. Foster, 22.06.2004

³¹ siehe IGS Electronic Mail, Nachricht Nr. 4199 vom 16.12.2002 (»MANZ discontinuity«)

5. Experimentelle Prüfung

Während in den Kapiteln 2 bis 4 die theoretischen Grundlagen zur präzisen kinematischen Positionsbestimmung gelegt wurden, soll nun - vor der praktischen Anwendung im Rahmen ausgewählter wissenschaftlicher Projekte - an Hand bestimmter Experimente die Leistungsfähigkeit und Korrektheit der entwickelten Methoden bzw. Algorithmen veranschaulicht werden. Zunächst werden die Beobachtungen eines typischen Zweifrequenz GPS-Empfängers einer statistischen Analyse unterzogen. Weiterhin wird in diesem Kapitel die Problematik der - gelegentlich notwendigen - Interpolation der Messdaten angesprochen, und im Abschnitt 5.3 folgt schließlich eine Diskussion von Positionierungsexperimenten unter Verwendung unterschiedlicher Prozessierungs- und Netzwerkkonfigurationen.

5.1 Überprüfung der statistischen Verteilung

Eine wichtige Frage bei der Verarbeitung von GNSS Daten ist die nach der statistischen Verteilung der eingehenden Beobachtungen. In Kapitel 2 wurde deutlich gemacht, dass die meisten Mehrdeutigkeitssuchverfahren von einer Normalverteilung der Beobachtungen ausgehen. Diese Aussage trifft in besonderem Maße auch für die in dieser Arbeit zur Anwendung kommende LAMBDA-Methode zu. Sollten die doppelten Differenzen nicht der Normalverteilung folgen, so können von diesem Algorithmus zur Ganzzahlsuche keine korrekten bzw. nur verzerrte Ergebnisse erwartet werden. In der Fachliteratur können nur erstaunlich wenige Abhandlungen zu diesem Thema gefunden werden. TIBERIUS und BORRE [1999] stützten die Annahme einer Normalverteilung. Ergänzend soll an dieser Stelle aber eine eigene Aussage zu diesem Thema erfolgen.

5.1.1 Messungen auf einer »Null-Basislinie«

Um den Einfluss externer Fehlerquellen wirksam auszuschalten und nur das Verhalten der eigentlichen Messgrößen des Empfängers zu analysieren, eignet sich die Messung auf einer sog. »Null-Basislinie«. Dazu wird eine Antenne über einen Signalsplitter mit zwei Empfängern verbunden. Die anschließend gebildeten doppelten Differenzen enthalten als systematischen Fehler die Phasen-Mehrdeutigkeiten sowie das Rauschen der Beobachtungen.

Für dieses Experiment wurden zwei Empfänger der Firma NovAtel verwendet, die auf der OEM3-Plattform basieren. Die nachfolgend erläuterten Ergebnisse können somit auch dazu dienen, eine Aussage über das Rauschniveau (in Form der Standardabweichung) der doppelten Differenzen dieser Geräte zu erhalten, um jene mit den bereits charakterisierten Empfangssystemen (siehe Tabelle 3.2) vergleichen zu können. Die Daten wurden am 5. Oktober 2004 vor der Messkuppel des Instituts für Erdmessung und Navigation mit einer Taktrate von 2 Hz und einer Dauer von ca. 30 Minuten aufgenommen. Insgesamt fanden etwas mehr als 27.000 Messwerte Eingang in die statistische Analyse.

5.1.2 Datenanalyse

Zunächst wird aus der Datenreihe ein Histogramm erzeugt, wobei in diesem Fall einheitlich eine Klassenbreite von 0,002 Zyklen verwendet wurde. Die so erhaltene tatsächliche Verteilung der Beobachtungen kann nun der zu erwartenden theoretischen Normalverteilungsfunktion gegenübergestellt werden. Dabei sei k_i die absolute Häufigkeit in der Klasse i mit den Begrenzungen x^l (links) und x^r (rechts) und $r_i = k_i/n$ die relative Häufigkeit mit n als Gesamtanzahl der verwendeten Daten (Stichprobenbreite). Die absoluten Klassenanzahlen können also bei Bedarf in einfacher Weise in relative Anteile umgerechnet werden.

Die üblichen Größen in Form des arithmetischen Mittelwertes \bar{x} (an Stelle des unbekannten wahren Wertes μ) und der zugehörigen empirischen Standardabweichung s (an Stelle der unbekannten

theoretischen Standardabweichung σ) beschreiben die Stichprobe. Aus der Analyse des Histogramms ergibt sich weiterhin die Schiefe der Verteilung¹ Ψ .

Mittelwert und Standardabweichung erlauben die Aufstellung der aus der Theorie zu erwartenden Wahrscheinlichkeits-Dichtefunktion f

$$f(x) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \frac{(x - \bar{x})^2}{s^2}\right) \quad , \quad (5.1)$$

und die Normalverteilungsfunktion ergibt sich nach PELZER [1985] als Integralausdruck

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(v) \cdot dv \quad . \quad (5.2)$$

Unter Annahme dieser Normalverteilung kann nun die für jede Klasse i zu erwartende relative Häufigkeit (Wahrscheinlichkeit)

$$r_i^N = F(x_i^r) - F(x_i^l) \quad (5.3)$$

berechnet werden. Ebenfalls kann daraus die Anzahl der zu erwartenden Stichprobenwerte

$$k_i^N = n \cdot r_i^N \quad (5.4)$$

in jeder der aufgestellten Klassen ermittelt werden.

Zur Berechnung der Quantile der Normalverteilung kann die HASTINGS-Approximation Anwendung finden². Mit den Hilfsformeln

$$q_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp(-0,5 \cdot x^2) \quad \wedge \quad t = \frac{1}{1 + 0,2316419 \cdot |x|} \quad (5.5)$$

sowie

$$w = q_i \cdot (0,31938153 \cdot t - 0,356563782 \cdot t^2 + 1,78147937 \cdot t^3 - 1,821255978 \cdot t^4 + 1,330274429 \cdot t^5) \quad (5.6)$$

kann das Quantil der (normierten) Normalverteilung an der Stelle x angenähert werden:

$$F(x) \approx \begin{cases} 1-w & \text{für } x \geq 0 \\ w & \text{für } x < 0 \end{cases} \quad . \quad (5.7)$$

Als Maß der Übereinstimmung zwischen tatsächlicher und theoretischer Verteilung werden hier die Differenzen der relativen Häufigkeiten

$$\Delta_i = r_i^N - r_i \quad (5.8)$$

¹ Die Schiefe einer statistischen Verteilung ist ein Maß für deren Abweichung von der üblicherweise vermuteten Symmetrie. Werte nahe null deuten auf eine gute, beidseitig gleichmäßige Verteilung der Daten hin. Die Details zur Ermittlung dieser Kenngröße finden sich bspw. in HÖPCKE [1980, S. 201].

² siehe CASIO [1989, S. 160]

herangezogen und die zugehörige Standardabweichung s_r abgeleitet. Δ_{\max} steht für die maximale Abweichung in einem bestimmten Histogramm.

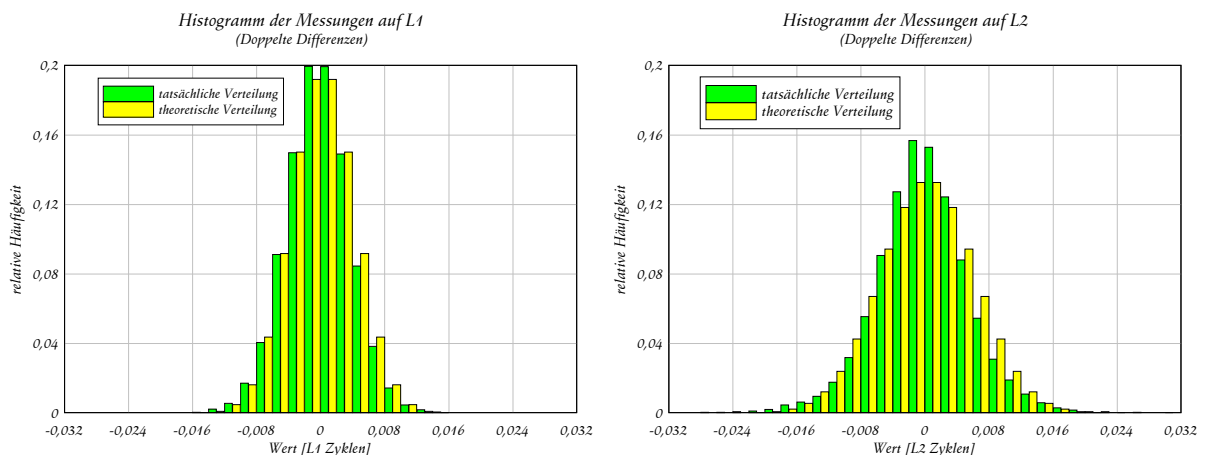
5.1.3 Vergleich mit Soll-Verteilung

Abbildungen 5.1a,b zeigen die bestimmten Häufigkeitsverteilungen für die doppelten Differenzen der L_1 - bzw. L_2 -Messungen. Die Histogramme basieren jeweils auf einer Klassenbreite von 0,002 Phasenzyklen. Tabelle 5.1 stellt die zugehörigen statistischen Kenndaten dar.

Das Phasenrauschen der doppelten Differenzen liegt bei 0,76 mm für L_1 und 1,44 mm für Messungen auf L_2 . Für nicht-differenzierte Messungen ergäbe sich somit ein Rauschniveau von 0,38 mm bzw. 0,72 mm als Mittelwert über sämtliche Messungen. Im Vergleich zu den anderen in Tabelle 3.2 aufgelisteten Geräten würde der NovAtel OEM3-Empfänger somit den dritten Rang einnehmen.

Im Vergleich zu den aus der angenommenen Normalverteilung ermittelten Wahrscheinlichkeiten (in gelber/hellgrauer Farbe eingezeichnet) zeigen sich nur geringe Abweichungen, die maximal 0,8% für die L_1 - und 2,4% für die L_2 -Daten betragen. Auch die Schiefe der Verteilung liegt nahe bei null. Sie ist in beiden Fälle leicht negativ, d.h. die vorhandene - wenn auch sehr schwach ausgeprägte - Asymmetrie konzentriert sich auf den positiven Wertebereich. In jedem Fall kann die Annahme, dass die Messdaten des verwendeten GPS-Empfängers in guter Näherung einer Normalverteilung entsprechen, gestützt werden.

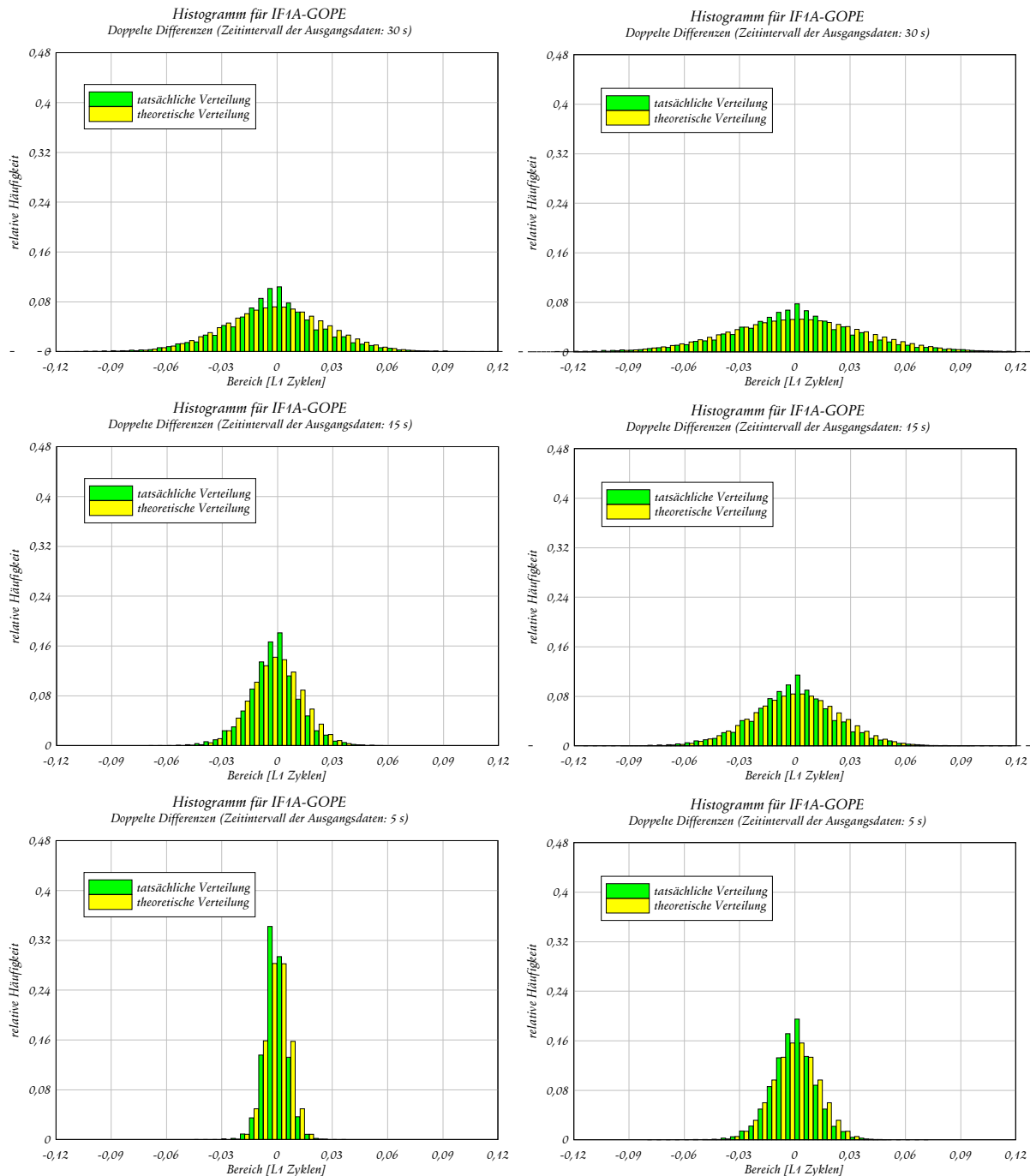
Auch in den folgenden Abschnitten dieses Kapitels soll der Aspekt der Verteilungsfunktion weiter nicht aus dem Blickwinkel verloren werden, da in diesem Abschnitt im Wesentlichen das dem Empfänger eigene Rauschen untersucht wurde, ohne dabei externe Einflüsse zu berücksichtigen, die auf die zu verarbeitenden Größen wirken und unter Umständen eine Verzerrung der statistischen Verteilung bewirken könnten.



Abbildungen 5.1a-b: Statistische Verteilung der doppelten Differenzen für die Messungen auf L_1 (links, a) und jene auf L_2 (rechts, b), wobei der Wertebereich jeweils in Einheiten von Phasen-Zyklen angegeben wurde, d.h. zur Umrechnung in metrische Einheiten sind die L_1 -Werte mit 0,190 m und die L_2 -Werte mit 0,244 m zu multiplizieren. Die tatsächliche Verteilung (grün/dunkelgrau) wurde der theoretisch zu erwartenden Normalverteilung (gelb/hellgrau) gegenübergestellt.

Datensatz	Mittelwert \bar{x}	Std.abw. s_v	Schiefe Ψ	Std.abw. s_r	max. Diff. Δ_{\max}
L_1 -Daten	$4,1 \cdot 10^{-6}$ mm	0,76 mm	-0,018	0,3%	0,8%
L_2 -Daten	$-2,9 \cdot 10^{-5}$ mm	1,44 mm	-0,002	0,6%	2,4%

Tabelle 5.1: Darstellung der wesentlichen statistischen Kenngrößen der Datensätze. Die Standardabweichung (3. Spalte) charakterisiert das Rauschniveau der doppelten Differenzen. Die Standardabweichung aus den Differenzen kann als Gütemaß für die Übereinstimmung mit der erwarteten theoretischen Normalverteilungsfunktion aufgefasst werden und die maximale Abweichung gibt die maximale Differenz zwischen der relativen Häufigkeit des empirisch bestimmten Histogramms im Vergleich zur erwarteten Normalverteilungsfunktion an.



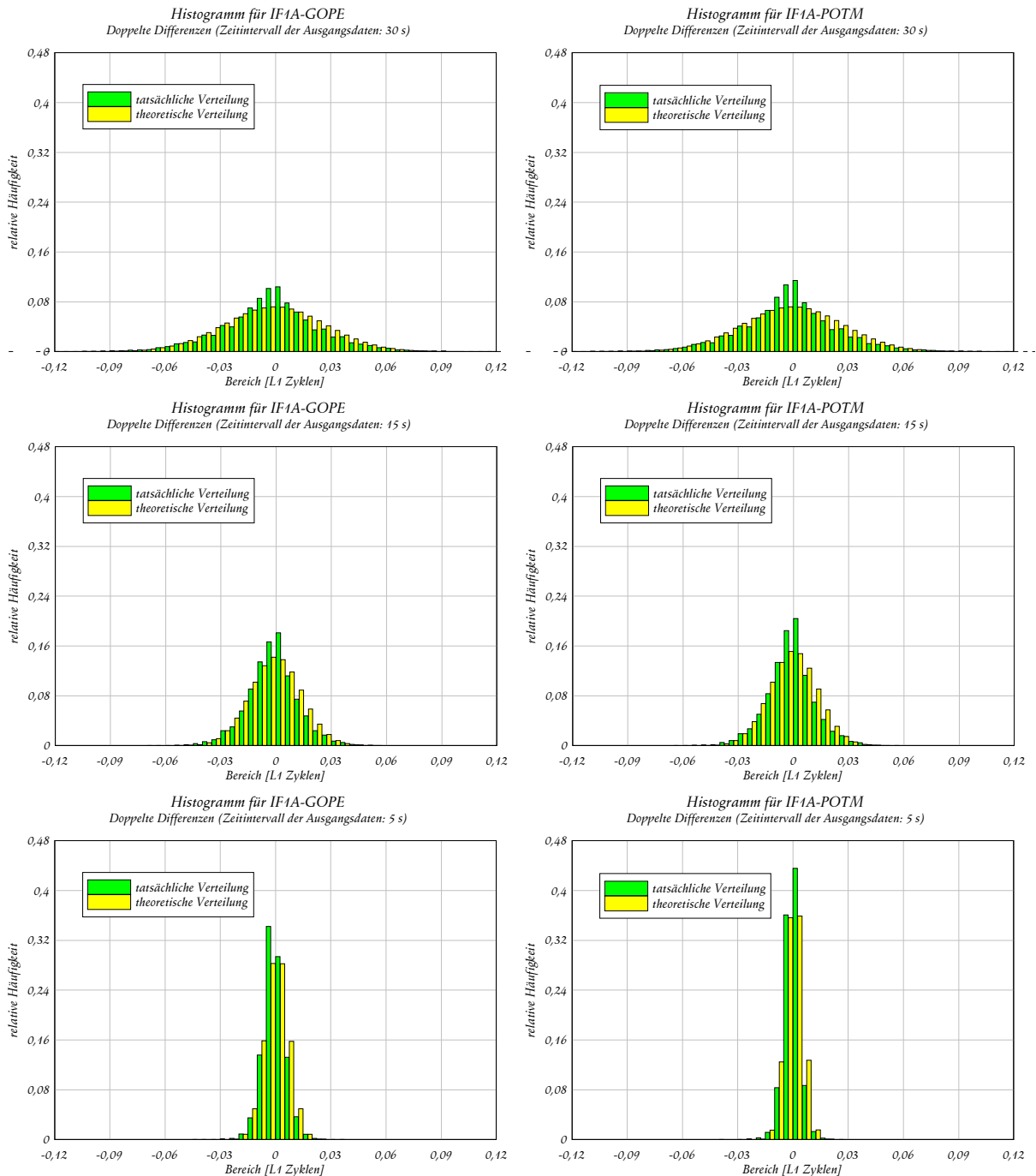
Abbildungen 5.2a-f: Empirisch ermittelte Verteilung der Diskrepanzen zwischen den gemessenen und den interpolierten doppelten Differenzen auf der Basislinie IF1A-GOPE und die erwartete theoretische Normalverteilung (gelb/hellgrau). Auf der linken Seite wird ein Datensatz unter ruhigen ionosphärischen Bedingungen dargestellt, auf der rechten Seite kann von stärkerer Ionosphärenaktivität ausgegangen werden.

5.2 Interpolation von Messdaten

Bei verschiedenen Projekten rekrutierten sich die benutzten Referenzstationen aus Netzwerken, deren Daten frei zugänglich sind. Dazu zählen beispielsweise das IGS Netzwerk³ und das EUREF Netz⁴. Nachteilig wirkt sich dabei aus, dass die bereitgestellten Daten lediglich mit einem Aufzeichnungsintervall von 30 s vorliegen, im Falle der nachträglich vom Landesvermessungsamt Sachsen für das

³ siehe <http://igsb.jpl.nasa.gov/network/netindex.html> (23. November 2004)

⁴ siehe Kapitel 4



Abbildungen 5.3a-f: Empirisch ermittelte Verteilung der Diskrepanzen zwischen den gemessenen und den interpolierten doppelten Differenzen auf der Basislinie IF1A-GOPE (links; korrespondieren mit den Abbildungen auf der vorhergehenden Seite) sowie IF1A-POTM (rechts) unter nächtlichen Ionosphärenbedingungen.

BALTIMOS-Projekt⁵ bereitgestellten SAPOS-Daten betrug das Intervall 15 s. Kinematische Positionierungen werden hingegen grundsätzlich mit höherer Taktrate durchgeführt, woraus sich die Notwendigkeit einer zeitlichen Verdichtung der Referenzstationsdaten ergibt. Die wesentliche Voraussetzung dazu wurde von Seiten des GPS Systembetreibers durch die Deaktivierung der SA-Sicherungstechnik im Mai 2000 erfüllt⁶. Zuvor vereitelten die künstlich hervorgerufenen Frequenzinstabilitäten der GPS-Satelliten eine ausreichend präzise Interpolation der Daten.

⁵ siehe Kapitel 7

⁶ siehe auch ALKAN [2001]

5.2.1 Algorithmus

Aus den Messungen auf Referenzstation A zum Satelliten i kann zur Epoche k der Empfänger-Uhrfehler

$$\delta t_A = \frac{S_{A,L1,k}^i - \rho_{A,k}^i - \delta S_{A,L1,Ion,k}^i - \delta S_{A,Trop,k}^i}{c} + \delta t_k^i \quad (5.9)$$

ermittelt werden. Eine weitere Berechnung zur Epoche $k+1$ gestattet eine lineare Interpolation des Uhrfehlers zu jeder Zwischenzeit, zu der interpolierte Daten gewünscht werden. Prinzipiell kann der Empfänger-Uhrfehler auch als Mittelwert über mehrere Satelliten abgeleitet werden, doch muss das verwendete Ensemble zu den beiden Epochen k und $k+1$ zur Vermeidung von Diskontinuitäten grundsätzlich identisch sein⁷.

Die Interpolation der Daten erfolgt auf Basis der Beobachtungsresiduen. Die Streckenmessungen können beispielsweise auf

$$\Delta S_{A,L1,k}^i = S_{A,L1,k}^i - \rho_{A,k}^i - c \cdot (\delta t_A - \delta t_k^i) \quad (5.10)$$

reduziert werden und beinhalten somit noch maßgeblich die Effekte der atmosphärischen Refraktion. Zwischen zwei Zeitpunkten k und $k+1$ können die Daten nun zweckmäßig verdichtet werden, wobei im Falle eines aufgetretenen Phasensprungs zur Epoche $k+1$ keine Interpolation der Phasensmessungen erfolgen kann⁸. Als Interpolationsverfahren wird in diesem Fall eine einfache lineare Trendfunktion gewählt, da eine Beschränkung auf zwei Basisepochen erfolgt. Die Größe des Empfänger- und Satellitenuhrfehlers wird entsprechend ermittelt, ebenso wie die Beobachtungsresiduen für Phasen und Strecken. Die geometrische Distanz ρ folgt aus den zum Interpolationszeitpunkt gültigen Satellitenpositionen.

Die Genauigkeit dieses Verfahrens wird gegenwärtig maßgeblich durch die Variationen der atmosphärischen Refraktion innerhalb des durch die beiden Basisepochen k und $k+1$ definierten Zeitintervalls definiert, wobei der ionosphärischen Laufzeitverzögerung der größere Fehleranteil beigemessen werden kann.

5.2.2 Testbeispiel

Für die Stationen GOPE (Ondrejov, Tschechien) und POTM (Potsdam, Deutschland) wurden am 06.09.2004 Daten mit einer ursprünglichen Dichte von 1 Hz entnommen und ein ionosphärisch wenig aktives Fenster von 1 bis 4 h GPS-Zeit sowie ein Zeitbereich höherer Ionosphärenaktivität von 11 bis 14 h GPS-Zeit extrahiert. Die Daten wurden auf 30 s, 15 s bzw. 5 s ausgedünnt und anschließend wieder auf 1 Hz verdichtet. Anschließend erfolgte die doppelte Differenzbildung mit Bezug auf die Station IF1A (Unterbiberger, Deutschland), deren Daten nicht verändert wurden.

Die Abbildungen 5.2a-f zeigen die Histogramme der Differenzen zwischen den interpolierten und den ursprünglichen Messdaten mit einer Klassenbreite von einheitlich 0,005 Zyklen. Gebildet wurden die doppelten Differenzen in diesem Beispiel zur Station GOPE jeweils in der Nacht und zur Mittagszeit. Die Abbildungen 5.3a-f zeigen auf der linken Seite die bereits angesprochenen Diagramme für IF1A-GOPE für die Nacht, nun aber im Vergleich zu den Differenzen für die Basislinie IF1A-POTM. Sämtliche Darstellungen zeigen die Ergebnisse für die L_1 -Daten. Die statistischen Kenndaten wurden in Tabelle 5.2 für IF1A-GOPE (Nacht und Mittag) sowie in Tabelle 5.3 für IF1A-POTM (nur Nacht) zusammengestellt. Die Stichprobenbreite beträgt ca. 50.000 Messungen für die Daten auf Basislinie

⁷ siehe auch WANNINGER [2000]

⁸ Würde über Phasensprünge hinweg interpoliert werden, so könnte dies negative Effekte bewirken, da auf Grund der linearen Interpolation des Sprunges dessen Amplitude bzgl. zweier aufeinanderfolgender Epochen nunmehr vermindert wird. Die Detektion der Phasensprünge durch die Auswertesoftware würde somit erheblich verkompliziert und in bestimmten Fällen unmöglich werden.

Datensatz	Mittelwert \bar{x}	Std.abw. s_e	Schiefe Ψ	Std.abw. s_r	max. Diff. Δ_{max}
Nacht, 30 s	-0,27 mm	5,3 mm	-0,029	0,7%	3,3%
Mittag, 30 s	0,06 mm	7,2 mm	0,050	0,5%	2,5%
Nacht, 15 s	0,00 mm	2,6 mm	0,003	1,1%	4,3%
Mittag, 15 s	-0,01 mm	4,5 mm	0,105	0,5%	3,0%
Nacht, 5 s	0,00 mm	1,2 mm	-0,052	1,6%	5,9%
Mittag, 5 s	0,01 mm	2,4 mm	-0,038	0,8%	3,8%

Tabelle 5.2: Darstellung der wesentlichen statistischen Kenngrößen für die Genauigkeitsanalyse der interpolierten Datensätze auf der Basislinie IF1A-GOPE.

Datensatz	Mittelwert \bar{x}	Std.abw. s_e	Schiefe Ψ	Std.abw. s_r	max. Diff. Δ_{max}
Nacht, 30 s	-0,22 mm	5,2 mm	0,105	0,8%	4,3%
Nacht, 15 s	-0,15 mm	2,5 mm	-0,003	1,5%	5,6%
Nacht, 5 s	0,01 mm	0,9 mm	-0,108	2,2%	7,7%

Tabelle 5.3: Darstellung der statistischen Kenngrößen für die Genauigkeitsanalyse der interpolierten Datensätze auf der Basislinie IF1A-POTM.

IF1A-GOPE und einem Ausgangsintervall von 15 bzw. 30 s sowie etwas weniger als 43.000 Werte für IF1A-GOPE und ein Ausgangsintervall von 5 s. Der geringere Umfang ist damit zu begründen, dass im 5 s Datensatz mehr Originaldaten vorhanden sind, für die ein Vergleich nicht sinnvoll wäre. Für IF1A-POTM gingen 60.392 (30 s), 58.407 (15 s) bzw. 50.119 (5 s) doppelte Differenzgrößen in die Analyse ein.

Grundsätzlich kann bzgl. der erzielten Präzision eine klare Abhängigkeit vom Intervall der Ausgangsdaten festgestellt werden. Liegen die Messungen bereits mit einer zeitlichen Auflösung von 5 s vor, so wird eine Übereinstimmung erzielt, die bereits in Richtung des Rauschniveaus der GPS-Empfänger strebt (0,9 mm für IF1A-POTM in der Nacht und immer noch 2,4 mm für IF1A-GOPE für den Mittag). Für Daten im 30 s Takt müssen stärkere Genauigkeitseinbußen in Kauf genommen werden. In keinem Fall wurde diesbzgl. eine Standardabweichung von besser als 5 mm erreicht. Ein Genauigkeitsverlust zwischen dem Mittagsdatensatz bei stärkerer Ionosphärentätigkeit im Vergleich zum Nachtdatensatz kann deutlich konstatiert werden, auch wenn er sich mit $s = 7,2$ mm im Vergleich zu 5,3 mm (IF1A-GOPE, 30 s) in diesem Beispiel innerhalb akzeptabler Grenzen bewegt. Ein guter Teil der sich in den aus den Differenzen berechneten Standardabweichungen dürfte auf Mehrewege-Effekte zurückzuführen sein, die in den Originaldaten ihren »natürlichen« Niederschlag finden, in den ausgedünnten und dann wieder verdichteten Daten aber ebenfalls linear interpoliert werden und sich somit in den Streumaßen widerspiegeln werden.

Ein Vergleich mit der erwarteten Normalverteilungsfunktion zeigt maximale Abweichungen von 2,5% (IF1A-GOPE, 30 s, Mittag) und 7,7% (IF1A-POTM, 5 s, Nacht). Die zugehörigen Standardabweichungen bewegen sich zwischen 0,5% und 2,2%. Insgesamt kann auf Grund dieser Ergebnisse festgestellt werden, dass die Interpolation der Messdaten deren statistische Verteilung nicht nachweislich verändert. Es kann also weiterhin von der Gültigkeit normalverteilter Größen ausgegangen werden. Die Asymmetrie der Verteilung fällt hier bei einigen Datensätzen allerdings im Vergleich zu den Null-Basislinien-Messungen aus Abschnitt 5.1 ein wenig stärker aus.

5.3 Positionierungs-Experimente

Zur ersten Prüfung der entwickelten Positionierungs-Algorithmen wurden am 16.08.2004 verschiedene Experimente über unterschiedlich lange Basislinien durchgeführt. Ein auf Pfeiler 6204 aufgestellter GPS-Empfänger bzw. die Station IF1A des Instituts für Erdmessung und Navigation (Unterbiberg) fungierten dabei formell als »Rover«. Zwar befanden sich die Systeme ebenfalls nicht in Bewegung, doch werden ihre Daten bei der Auswertung mit den kinematischen Algorithmen bearbeitet, so dass ein Vergleich mit der über statische Prozessierung gewonnenen Soll-Lösung auf

einfache Weise möglich ist⁹. Die Koordinaten sämtlicher Netzkpunkte liegen aus einer Kalman-Filterung mit dem Analyseprogramm GTCE/TropAC¹⁰ als Wochenlösung für GPS Woche 1284 im ITRF vor.

Zunächst erfolgt die Betrachtung einer sehr kurzen Basislinie von wenigen Zehnermetern, wobei IF1A als Referenzstation und 6204 als Rover fungieren. Anschließend wird auf größere Entfernungsbereiche übergangen, die auch die sehr lange Basislinie IF1A (Rover) - GOPE (Referenzstation) einschließen, weiterhin Betrachtungen mittellanger Entfernungen (IF1A-WTZR sowie BZRG) und eine abschließende Analyse der kurzen Basislinie IF1A-OBE2 beinhalten. Entfernungen ab 200 km bis 400 km werden im Rahmen dieser Arbeit als »lange Basislinien«, der Entfernungsbereich von 50 bis 200 km als »mittellange Basislinie« und der Bereich bis 50 km als »kurze Basislinie« bezeichnet. Die Daten der Referenzstationen WTZR, BZRG sowie OBE2 lagen im Ausgangsintervall von 30 s und wurden auf 1 Hz interpoliert.

5.3.1 Sehr kurze Basislinie

Auch wenn die Konzentration in diesem Kapitel grundsätzlich auf größere Entfernungen gelegt wird, sollen doch am Beispiel einer sehr kurzen Basislinie von 41 m Länge die Vorteile der kinematischen Positionierung im Nahbereich illustriert werden. Auf Grund der Nähe zur Referenzstation werden die von der Entfernung abhängigen Fehler wirksam eliminiert.

Als Ort des »Rovers« wurde bewusst der Punkt 6204 vor der Messkuppel gewählt, der sich durch eher weniger gute Sichtbarkeitsbedingungen und verstärkten Mehrwege-Einfluss auszeichnet. Über das Beobachtungsfenster von rund 37 min. beginnend um 14:23 h GPS-Zeit konnten aus diesem Grunde lediglich 5 doppelte Differenzen gebildet werden.

5.3.1.1 Statische Positionierung

Die im statischen Auswertemodus gewonnene Position soll nachfolgend als Referenz für die Vergleiche mit den kinematischen Analysen dienen. Unter Nutzung des LAMBDA-Algorithmus zur Mehrdeutigkeitsfixierung und ausschließlicher Nutzung von L_1 -Daten wird eine horizontale Position von $\varphi = 48,07776571^\circ$; $\lambda = 11,62876317^\circ$ sowie eine ellipsoidische Höhe von $h = 594,610$ m ermittelt.

In Tabelle 5.4 wurden weitere statische Lösungen zusammengefasst und die Positionsabweichungen im Vergleich zur fixierten Lösung über die Gesamtzeitspanne dargestellt. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse unter Nutzung der Fließkomma-Lösung für die Mehrdeutigkeiten um 4 mm vertikal und 5 mm horizontal abweichen. Alle anderen Lösungen nutzen die Mehrdeutigkeitsfixierung und weisen teilweise trotz erheblich kürzerer Beobachtungsdauer von bis zu minimal 2 min. - geringere Abweichungen zur Solllösung auf.

Lösung	Fixierung	horizontale Abweichung	vertikale Abweichung
Gesamtzeitspanne, 37 min.	nein	5 mm	4 mm
Zeitspanne von 18 min.	ja	1 mm	0 mm
Zeitspanne von 9 min.	ja	1 mm	1 mm
Zeitspanne von 5 min.	ja	1 mm	3 mm
Zeitspanne von 2 min.	ja	2 mm	2 mm

Tabelle 5.4: Ergebnisse statischer Positionierungen über die sehr kurze Basislinie IF1A-6204. Als Referenzlösung dient die fixierte Lösung über die gesamte Zeitspanne von 37 min.

⁹ Eine andere Bewertung der Richtigkeit und Genauigkeit der Lösungen ist schwierig: Wesentliche Motivation bei der Entwicklung der kinematischen Algorithmen für lange Basislinien bestand im Nichtvorhandensein entsprechender Auswertesoftware. Insofern konnte eine Referenzlösung über eine andere Software nicht erstellt werden.

¹⁰ siehe auch SCHÜLER [2001]

5.3.1.2 Kinematische Positionierung

Im Vergleich zur statischen Positionierung wird im kinematischen Modus zu jeder Epoche eine neue Position geschätzt. Um die Verarbeitungsgeschwindigkeit zu erhöhen, kann in diesem Schritt, der Blockausgleichung, eine Reduktion der zeitlichen Auflösung vorgenommen werden. Diese Maßnahme basiert auf der Theorie, dass die Beobachtung eines möglichst langen Satellitenbogens eine wesentlich größere Bedeutung für die (genäherte) Positionsbestimmung hat als die gehäufte Nutzung zeitlich eng beieinander liegender Beobachtungen.

Beschreibung der Lösungsstrategie	Anzahl Tripel	$\Delta\varphi_{\text{Mittel}}$ $\Delta\varphi_{\text{Max.}}$	$\Delta\lambda_{\text{Mittel}}$ $\Delta\lambda_{\text{Max.}}$	Δh_{Mittel} $\Delta h_{\text{Max.}}$	N: $s_{v(\varphi)}$ N: $s_{\varepsilon(\varphi)}$	O: $s_{v(\lambda)}$ O: $s_{\varepsilon(\lambda)}$	V: $s_{v(h)}$ V: $s_{\varepsilon(h)}$
1 Position pro 60 s, 37 min.	40	0 mm 14 mm	0 mm 7 mm	2 mm 20 mm	5 mm 5 mm	2 mm 2 mm	9 mm 9 mm
1 Position pro 30 s, 37 min.	77	0 mm 14 mm	0 mm 7 mm	1 mm 24 mm	5 mm 5 mm	2 mm 2 mm	8 mm 8 mm
1 Position pro 15 s, 37 min.	151	-1 mm 14 mm	0 mm 7 mm	1 mm 24 mm	5 mm 5 mm	2 mm 2 mm	8 mm 8 mm
1 Position pro 7 s, 8 min.	73	0 mm 10 mm	0 mm 6 mm	0 mm 16 mm	5 mm 5 mm	3 mm 3 mm	7 mm 7 mm
wie vorher, partiell fixiert	73	-2 mm 13 mm	16 mm 22 mm	61 mm 78 mm	5 mm 5 mm	3 mm 16 mm	10 mm 61 mm

Tabelle 5.5: Kinematische Positionslösung aus der Blockausgleichung im Vergleich zur Referenzlösung aus der statischen Analyse. Die Kurzfassung der Lösungsstrategie enthält Angaben über die zeitliche Dichte des Positionsupdates sowie über das gesamte genutzte Zeitfenster. Im letzten Beispiel wurden zum Vergleich nur 2 der 5 Mehrdeutigkeiten fixiert.

Tabelle 5.5 zeigt Positionierungsergebnisse im Vergleich zur statischen Referenzlösung unter Verwendung unterschiedlicher Zeitintervalle und Zeitfenster. Wird das gesamte zur Verfügung stehende Zeitfenster von 37 min. verwendet, so liegen die Standardabweichungen allesamt in einem sehr ähnlichen Bereich. Die größte Unsicherheit ergibt sich im Vertikalkanal mit 7 bis 9 mm. Die maximalen Abweichungen betragen 24 mm (ebenfalls in der Höhenkomponente). Eine Reduktion des Zeitfensters ist bei diesem Experiment bis auf ca. 8 min. möglich, ohne dass die Mehrdeutigkeitsfixierung Nachteile erhält. Allerdings wurde in diesem Fall bereits eine weitere zeitliche Verdichtung auf 1 Position je 7 s vorgenommen. Die Übereinstimmung mit der statisch gewonnenen Lösung ist auch in diesem Fall sehr konsistent. Im Vergleich zu dieser Lösung zeigen die Positionen mit lediglich zwei fixierten Mehrdeutigkeiten (letzte Zeile der Tabelle) bereits deutlich stärkere Abweichungen, im Wesentlichen in der Höhe, die maßgeblich systematischer Natur sind. Dies wird in dem erheblichen Unterschied zwischen der aus Verbesserungen berechneten Standardabweichung $s_{v(h)}$ und jener aus Differenzen ermittelten Standardabweichung $s_{\Delta(h)}$ reflektiert¹¹: Die vom mittleren systematischen Fehler befreiten Verbesserungen führen auf eine Standardabweichung, die kaum von jener der anderen Lösungen abweicht, während hingegen $s_{\Delta(h)}$ die Systematiken enthält und entsprechend in (Ost- und) Vertikalrichtung deutlich höher ausfällt. Dieses Phänomen ist typisch bei der Verwendung von Fließkommalösungen für die Mehrdeutigkeiten, die nur über kurze Zeitfenster abgeleitet wurden, da die beobachteten Bahnbögen für eine ausreichende geometrische Strenge nicht ausreichen.

5.3.2 Vergrößerter Entfernungsbereich

In den Experimenten unter Nutzung eines variablen Entfernungsbereichs von 26 km (OBE2) bis 308 km (GOPE) fungierte Punkt IF1A als »Rover«. Präzise IGS-Ephemeriden für die GPS-Satelliten wurden genutzt sowie das GDAS Wettermodell zur Bestimmung der troposphärischen Refraktion. Die

¹¹ Die aus Verbesserungen gewonnene Standardabweichung wird nachfolgend auch als »Präzision« bezeichnet, da sie die »innere Stimmigkeit« der Lösung repräsentiert, während jene aus Differenzen als »Genauigkeit« bezeichnet wird. Diese Wortwahl ist gerechtfertigt, sofern die Referenzwerte für die Berechnung der Differenzen den wahren Werten entsprechen bzw. ausreichend nahe kommen.

Behandlung der Ionosphäre erfolgte durch verschiedene Methoden. Für die stochastische Modellierung wurden die in Kapitel 3 dargestellten Analysen und Modell-Entwicklungen genutzt.

5.3.2.1 Gegenüberstellung der Lösungen

Tabelle 5.6 fasst eine Reihe von kinematischen Positionslösungen zusammen, Abbildung 5.4 stellt die Standardabweichungen aus den Verbesserungen (Präzision) und jene aus Differenzen (Genauigkeit) dar. Neben der vergleichsweise kurzen Basislinie IF1A-OBE2 (Lösungen 1 bis 4) wird eine Netzwerk-lösung über die Referenzstationen WTZR und BZRG (Lösungen 5 bis 8) dargestellt, wobei WTZR etwa 150 km und BZRG 177 km von IF1A entfernt ist. Es sei angemerkt, dass die Verarbeitung von mehr als einer Basislinie in diesem Fall Vorteile bzgl. der Mehrdeutigkeitsfixierung bedeutet hat, auch wenn auf beiden Stationen identische Sätze von Satelliten beobachtet wurden. Schließlich folgt mit den Lösungen 9 bis 13 ein Blick auf die lange Basislinie IF1A-GOPE, die 308 km aufweist. Die Lösungen 6, 8, 9 und 13 wurden dabei ohne Fixierung der Mehrdeutigkeiten gewonnen; was entweder in der Verwendung der ionosphärenfreien Linearkombination oder in einer systematischen Fehlerabschätzung zu begründen ist, die zur Ablehnung der Fixierung führte.

Beschreibung der Lösungsstrategie	ID Tripel	$\Delta\varphi_{\text{Mittel}}$ $\Delta\varphi_{\text{Max.}}$	$\Delta\lambda_{\text{Mittel}}$ $\Delta\lambda_{\text{Max.}}$	Δh_{Mittel} $\Delta h_{\text{Max.}}$	N: $s_{v(\varphi)}$ N: $s_{\varepsilon(\varphi)}$	O: $s_{v(\lambda)}$ O: $s_{\varepsilon(\lambda)}$	V: $s_{v(h)}$ V: $s_{\varepsilon(h)}$
IF1A-OBE2, L_1 T: NWM, I: AIM	1 169	2,2 cm 5,7 cm	-1,8 cm 7,5 cm	1,3 cm 10,0 cm	1,7 cm 2,8 cm	2,4 cm 3,0 cm	2,6 cm 3,0 cm
IF1A-OBE2, $L_{3;2}$ T: NWM, I: AIM	2 167	-0,2 cm 2,8 cm	2,0 cm 5,8 cm	-6,3 cm 13,0 cm	0,9 cm 1,0 cm	1,1 cm 2,3 cm	2,2 cm 6,6 cm
IF1A-OBE2, $L_{4;3}$ T: NWM, I: AIM	3 167	0,5 cm 2,6 cm	0,4 cm 3,4 cm	-2,0 cm 8,5 cm	0,8 cm 1,0 cm	0,9 cm 1,0 cm	2,3 cm 3,0 cm
IF1A-OBE2, $L_{5;4}$ T: NWM, I: AIM	4 167	1,0 cm 3,1 cm	-0,9 cm 3,0 cm	1,3 cm 6,7 cm	0,9 cm 1,3 cm	1,0 cm 1,3 cm	2,4 cm 2,7 cm
IF1A-BZRG+WTZR, $L_{5;4}$ T: NWM, I: AIM	5 173	0,4 cm 2,2 cm	0,3 cm 1,9 cm	0,8 cm 5,8 cm	0,8 cm 0,9 cm	0,7 cm 0,8 cm	1,7 cm 1,9 cm
IF1A-BZRG+WTZR, $L_{5;4}$ T: NWM, I: CMC; no fix!	6 173	-0,5 cm 2,6 cm	5,4 cm 6,9 cm	1,5 cm 4,9 cm	0,7 cm 0,9 cm	0,8 cm 5,4 cm	1,2 cm 1,9 cm
IF1A-BZRG+WTZR, $L_{9;7}$ T: NWM, I: CMC	7 173	0,9 cm 2,4 cm	0,1 cm 1,7 cm	1,5 cm 5,7 cm	0,7 cm 1,1 cm	0,6 cm 0,6 cm	1,5 cm 2,1 cm
IF1A-BZRG+WTZR, $L_{77;60}$ T: NWM, I: \times ; no fix!	8 173	-0,5 cm 2,3 cm	6,3 cm 7,8 cm	1,7 cm 5,1 cm	0,7 cm 0,8 cm	0,8 cm 6,3 cm	1,2 cm 2,1 cm
IF1A-GOPE, $L_{3;2}$ T: NWM, I: CMC; no fix!	9 171	0,9 cm 2,8 cm	6,9 cm 8,7 cm	-2,5 cm 4,9 cm	0,9 cm 1,3 cm	1,0 cm 7,0 cm	1,1 cm 2,7 cm
IF1A-GOPE, $L_{5;4}$ T: NWM, I: IONEX	10 171	0,1 cm 3,1 cm	0,9 cm 3,0 cm	-1,1 cm 4,4 cm	1,1 cm 1,1 cm	0,8 cm 1,3 cm	1,1 cm 1,6 cm
IF1A-GOPE, $L_{9;7}$ T: NWM, I: IONEX	11 171	0,1 cm 2,4 cm	0,3 cm 2,5 cm	-1,2 cm 4,0 cm	0,9 cm 0,9 cm	0,8 cm 0,9 cm	1,0 cm 1,5 cm
IF1A-GOPE, $L_{9;7}$ T: NWM, I: CMC	12 171	0,4 cm 2,2 cm	0,5 cm 2,4 cm	-1,2 cm 4,0 cm	0,9 cm 1,0 cm	0,7 cm 0,9 cm	1,0 cm 1,6 cm
IF1A-GOPE, $L_{77;60}$ T: NWM, I: \times ; no fix!	13 171	2,9 cm 4,7 cm	10,5 cm 12,3 cm	-3,1 cm 5,8 cm	0,9 cm 3,0 cm	1,1 cm 10,5 cm	1,1 cm 3,3 cm

Tabelle 5.6: Kinematische Positionslösungen über kurze, mittlere und lange Basislinien im Vergleich. (T: Troposphärenkorrektur, NWM: numerisches Wettermodell; I: Ionosphärenkorrektur, AIM: Annual Ionosphere Model, IONEX: Ionospheric Exchange File, CMC: »Code-minus-Carrier« Kombination).

Bezüglich der kurzen Basislinie IF1A-OBE2 fällt auf, dass die ermittelten Streumaße insgesamt ein wenig höher liegen als jene über längere Entfernungen. Zwar liegen die mittleren Differenzen ebenfalls über den systematischen Fehlern vieler Resultate, die über andere Referenzstationen gewonnen wurden, was auf etwas größere Unsicherheiten in den Stationskoordinaten von OBE2 schließen lässt. Allerdings weisen die ermittelten Genauigkeiten s_{Δ} zumeist keine großen Unterschiede zu den Präzisionen s_v auf, was einen starken Einfluss systematischer Fehler ausschließt.

Offenbar liegt die Hauptursache in der schlechteren Datenqualität, was auch im Rahmen der Vorverarbeitung bspw. durch eine relativ hohe Ausreißerrate bzgl. der Streckenmessungen zum Ausdruck kam. Trotzdem kann bei Anwendung der kinematischen Positionierungsalgorithmen von einer Standardabweichung zwischen 1,0 und 2,3 cm in den Horizontalkomponenten für die meisten Lösungen ausgegangen werden. In der Höhenkomponente kann eine Genauigkeit von ca. 3 cm konstatiert werden, abgesehen von Lösung 2, welche die Linearkombination $L_{3;2}$ verwendet, und deutlich aus dem Rahmen fällt. Es zeigt sich dabei ein systematischer Fehler von durchschnittlich -6 cm, der in Verbindung mit einer Fehlfixierung einer Mehrdeutigkeit zu bringen ist. Sämtliche Lösungen für diese Basislinie wurden unter Anwendung der Ionosphärenkorrektur über das jährliche Trendmodell (AIM) gewonnen, also einem vergleichsweise einfachen Ansatz, der den mittleren Zustand der Ionosphäre an einem bestimmten Ort unter Berücksichtigung saisonaler Variationen modelliert. In diesem Sinne wäre auch die Verwendung einer vereinfachten Troposphärenmodellierung durchaus gerechtfertigt gewesen, ohne größere Ungenauigkeiten in den Lösungen zu verursachen.

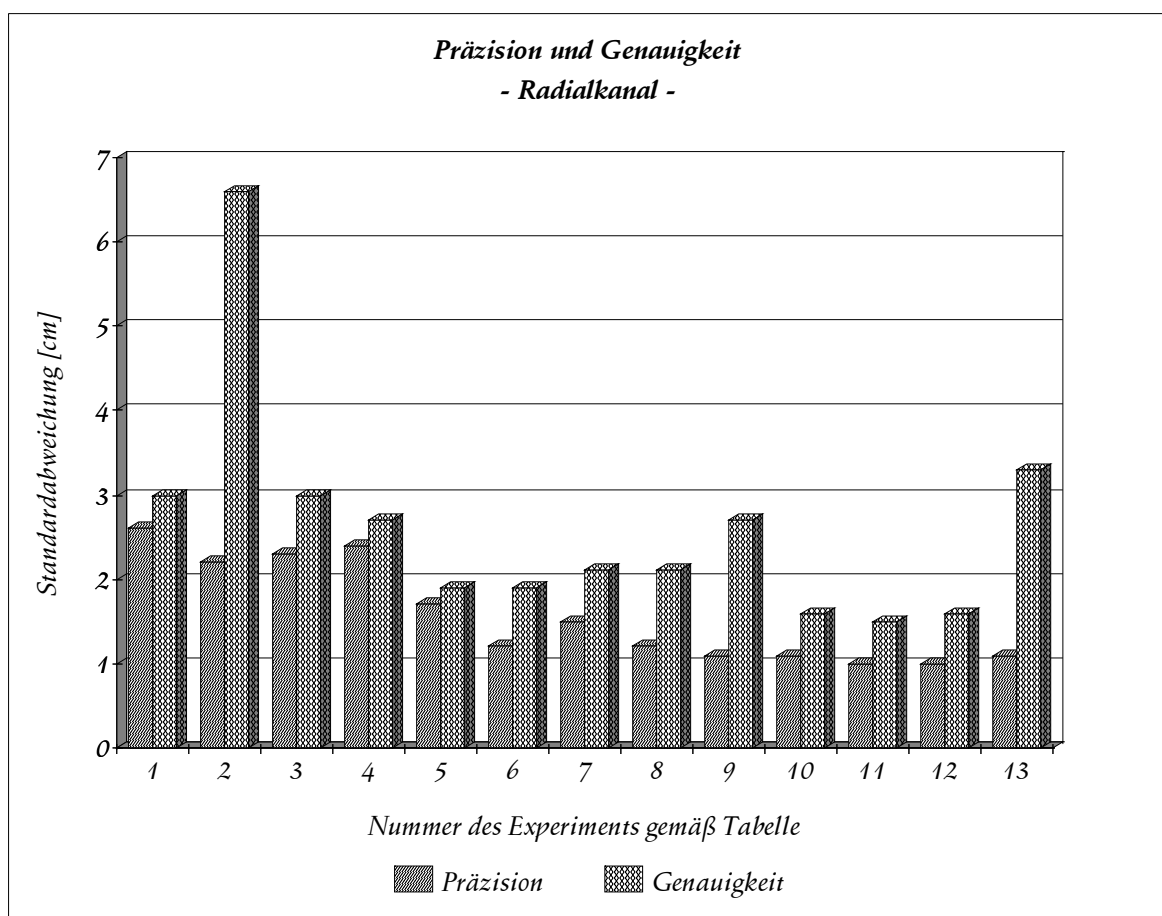


Abbildung 5.4: Grafische Darstellung der Präzision (Standardabweichung aus den Verbesserungen) und Genauigkeit (Standardabweichung aus Differenzen) für die Höhenkomponente; numerische Daten: siehe Tabelle 5.6.

Mit den Basislinien IF1A-WTZR bzw. IF1A-BZRG wird der mittlere Entfernungsbereich zwischen 150 und 200 km erreicht. Die erzielte Genauigkeit im Radialkanal liegt bei nahe 2 cm - das gilt in diesem Beispiel auch für die Lösungen ohne Mehrdeutigkeitsfixierung, die aber stärkere Ungenauigkeiten zwischen 5 und 6 cm in der Ostkomponente aufweisen. Interessant ist der Vergleich der Lösungen 5 und 6: Die Lösungsstrategien gleichen sich, in beiden Fällen wird Linearkombination $L_{5;4}$ verwendet, allerdings erfolgt in Lösung 5 die Verwendung des AIM-Ansatzes, während in Lösung 6 aus der Kombination von Strecken- und Phasenmessungen (CMC) der Ionosphärenfehler bestimmt wird. Lösung 5 nutzt vorhandene räumliche Korrelationen aus, während im CMC-Ansatz von stochastisch unabhängigen Fehlerkorrekturen ausgegangen werden muss, die komplett aus den

Messdaten gewonnen wurden. Die aus den höheren Standardabweichungen der Streckenmessungen folgenden Ungenauigkeiten der bestimmten ionosphärischen Laufzeitverzögerungen wirken nun aber teilweise systematisch, was vom Algorithmus berücksichtigt wird. Nach Abschätzung der systematischen Fehlerwirkung aus Troposphäre, Ionosphäre und Satellitenbahnen können nach Variationsrechnung die Mehrdeutigkeiten nicht eindeutig gelöst werden, so dass eine Fixierung unterbleibt. Hingegen erlaubt der AIM-Ansatzes in diesem Fall noch die zweifelsfreie Festsetzung der Mehrdeutigkeiten.

Mehr als 300 km beträgt die Entfernung IF1A-GOPE. Auf beiden Punkten waren Ashtech-Empfänger im Einsatz, d.h. eine vergleichsweise gute Qualität der L_2 -Daten bzw. ein relativ gutes L_2 Phasen-Tracking waren gewährleistet. Eine Dateninterpolation war nicht notwendig. Abgesehen von Lösung 13 (nur Fließkomma-Mehrdeutigkeiten verwendet) kann im Vergleich zu den vorhergehenden Lösungen eine nochmalige (geringe) Reduktion der Standardabweichungen in der Höhenkomponente konstatiert werden. Diese Tatsache ist insofern bemerkenswert, als die Basislinie im Vergleich zu IF1A-WTZR praktisch die doppelte Länge besitzt. Allerdings widerspricht diese Feststellung nicht zwingend der Theorie: Wird zur Ionosphärenkorrektur der CMC-Ansatz gewählt, so existiert keine Längenabhängigkeit mehr. Ebenfalls sind die bei einigen Lösungen verwendeten IONEX-Karten, die Korrekturen auf einem $2,5^\circ \times 5,0^\circ$ Gitter global zur Verfügung stellen, grundsätzlich für größere Entfernungsbereiche geeignet¹². Die Daten für WTZR und BZRG mussten hingegen von ihrem Ausgangsintervall von 30 s auf 1 Hz verdichtet werden, was gemäß Abschnitt 5.2 zu einer spürbaren Erhöhung der Standardabweichung der Phasenmessungen führt.

Insgesamt können die erzielten Ergebnisse als durchaus zufriedenstellend bewertet werden. Über den gesamten Entfernungsbereich von bis zu mehr als 300 km konnten vergleichsweise genaue Resultate für die drei Koordinatenkomponenten unter Anwendung kinematischer Auswertemethoden gewonnen werden. Die über sehr kurze Basislinien erzielbaren Standardabweichungen liegen häufig um gut 1 cm unten denen, die mit dem Langbasislinien-Algorithmus berechnet wurden. Trotzdem können viele hochgenaue Anwendungen offenkundig auch durch Verwendung von weiter entfernten Referenzstationen erfolgreich bedient werden, ohne dass jene flächenhaft verteilt sein müssen, d.h. auf die Einführung von Flächenkorrekturparametern kann verzichtet werden, wenngleich an dieser Stelle nicht in Abrede gestellt werden soll, dass diese Methode grundsätzlich zu einer Verbesserung der Genauigkeit der bestimmten systematischen Fehler führen würde, doch sind für die nachfolgend beschriebenen Anwendungen keine derartigen Flächennetze verfügbar.

5.3.2.2 Residuen-Analyse

Die Analyse der Verbesserungen wird mit den Hilfsmitteln durchgeführt, die in den Abschnitten 5.1 und 5.2 bereits eingeführt wurden. In diesem Zusammenhang muss jedoch auf folgende Einschränkungen bei der Interpretierbarkeit der Ergebnisse hingewiesen werden: In die statistische Analyse gehen die nach der Ausgleichung gewonnenen Verbesserungen (engl. »*post-fit residuals*«) ein. Eine Aussage, wie die eingehenden Beobachtungen verteilt sind, kann daher nur in sehr eingeschränktem Maße getroffen werden. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass die im Ausgleichungsprozess verwendeten Beobachtungen einem Gewichtungsprozess unterzogen werden, die zugehörigen Gewichtungskoeffizienten bei dieser Analyse jedoch keine Berücksichtigung finden. Schließlich sei auch erwähnt, dass die Stichprobenbreite mit ca. 1.000 bis 2.700 Werten - je nach Lösung - eher gering ist. Als Klassenbreite wurden einheitlich 5 mm gewählt.

Tabelle 5.7 stellt die bereits eingeführten Kenngrößen für die einzelnen Lösungen gegenüber, in den Abbildungen 5.5a-h folgen Häufigkeits-Diagramme für ausgewählte Experimente. Folgende Aussagen können gemacht werden: (a) Die empirische Häufigkeitsverteilung weist bei einigen Lösungen eine deutliche Asymmetrie auf, was durch vergleichsweise hohe Werte für die Schiefe Ψ ausgedrückt wird. (b) Die Standardabweichung s_r , die in diesem Zusammenhang die Übereinstimmung der gefundenen Verteilung mit der erwarteten Normalverteilung charakterisiert, weist insbesondere bei allen Lösungen über die längste Basislinie IF1A-GOPE im Test relativ große Werte auf, die bereits auf nicht

¹² Allerdings kann die relativ grobe Auflösung in bestimmten Fällen zu Genauigkeitseinbußen führen, so dass ihr Einsatz nicht immer unproblematisch ist.

unwesentliche Abweichungen von der theoretisch erwarteten Verteilung hindeuten. Grundsätzlich ist es dabei nicht verwunderlich, dass bei zunehmender Entfernung verbleibende Restfehler zu einer Verzerrung der Verteilung führen.

Lösung 1 kann in diesem Zusammenhang als Problemfall bezeichnet werden. Hier wurden reine L_1 -Daten zur Positionierung verwendet, d.h. die Ionosphärenwirkung wird in keiner Weise reduziert. Abweichungen der tatsächlichen Situation vom mittleren jährlichen Trendmodell AIM, die sicherlich vorhanden sind, wirken sich direkt aus. Offenkundig verursachen die zeitlichen Fluktuationen der ionosphärischen Refraktion trotz der noch recht kurzen Basislinie stärkere Asymmetrien und systematische Abweichungen.

5.3.2.3 Höhen-Analyse

Eine ähnliche statistische Analyse wie in 5.3.2.2 wurde für die bestimmten ellipsoidischen Höhen durchgeführt und in Tabelle 5.8 zusammengestellt (zu den Genauigkeitsangaben siehe Tabelle 5.6). Die Abbildungen 5.6a-h geben wiederum die Verteilungsfunktionen in grafischer Form wieder. Auch hier sei wiederum ausdrücklich auf die letztlich eingeschränkte Aussagekraft hingewiesen. Da die Zeitspanne begrenzt ist, umfasst die Stichprobenbreite nur rund 1.640 Werte. Trotzdem kann die Analyse gut zu dem Zweck dienen, die einzelnen Lösungen miteinander zu vergleichen und etwaige Diskrepanzen aufzudecken. Als Klassenbreite wurde einheitlich 0,005 m gewählt.

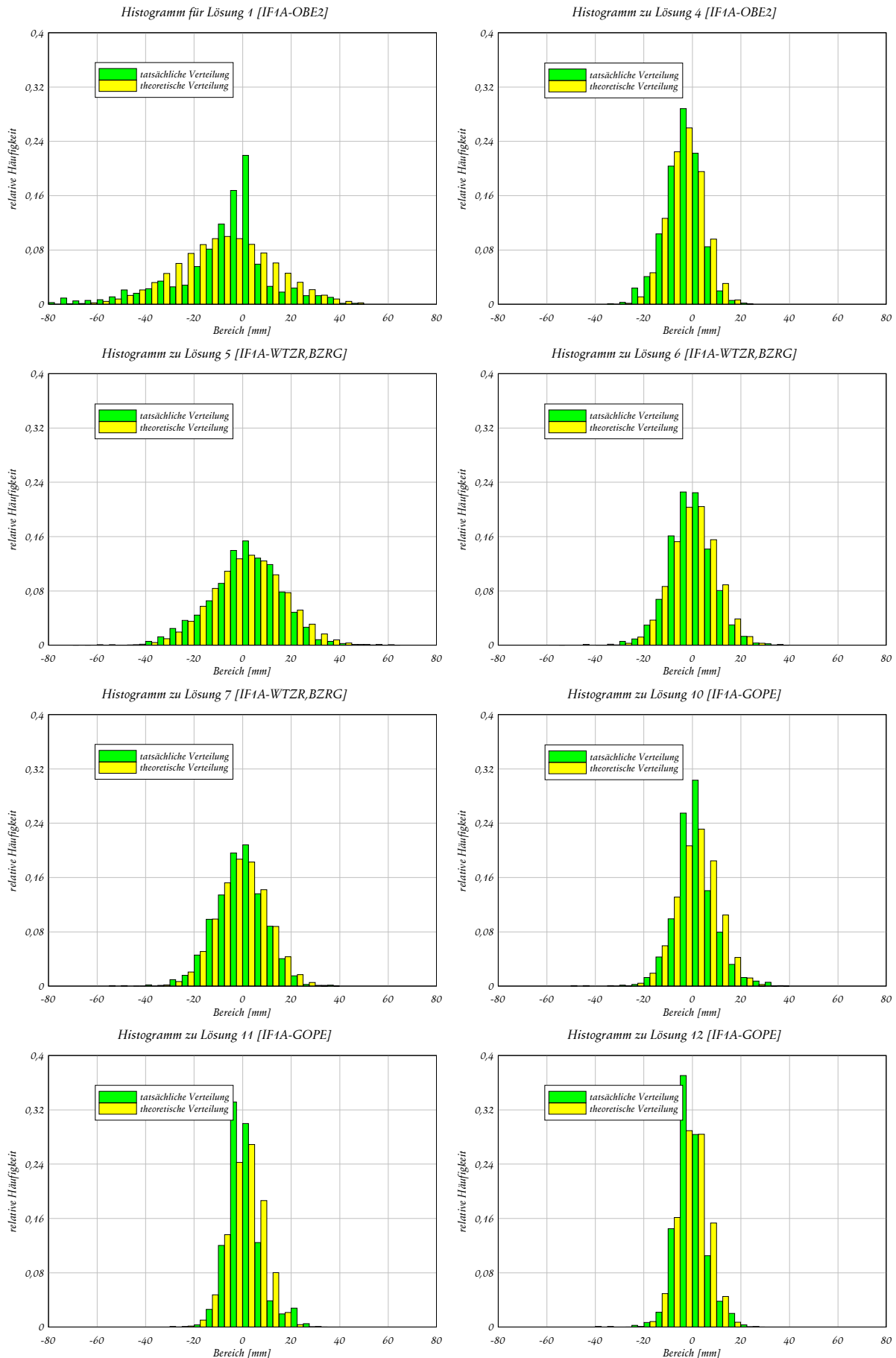
Gemäß der Ergebnistabelle liegt die Standardabweichung s_r in allen Fällen deutlich unter 2%. Insbesondere die über die Basislinie IF1A-OBE2 gewonnenen Höhen zeigen in ihrer Verteilung aber maximale Abweichungen von der erwarteten Normalverteilung von teilweise 4% und mehr, gleichzeitig weisen sie eine deutliche Asymmetrie auf, was ein Blick auf die Diagramme in den Abbildungen 5.6a-h ebenfalls verdeutlicht. Analog zu den bereits gemachten Aussagen zur Verteilung der à posteriori gewonnenen Verbesserungen, kann diese Basislinie in diesem Experiment als vergleichsweise problematisch bezeichnet werden. Die Änderungen in der Ionosphäre wirken sich insbesondere auf Lösung 1 verzerrend aus. Eine auch optisch sichtbare gute Übereinstimmung mit den Normalverteilungsfunktionen wird bzgl. der Lösungen über IF1A-GOPE erreicht.

5.3.2.4 Systematische Fehlerwirkung

Ein wesentlicher Entwicklungsschwerpunkt in dieser Arbeit liegt auf der Einführung systematischer Fehlerabschätzungen, um die gegenwärtigen Testprozeduren für die Fixierung der Mehrdeutigkeiten zu erweitern und robuster zu machen. Aus diesem Grunde soll an dieser Stelle eine Betrachtung der abgeschätzten systematischen Fehlerwirkungen erfolgen. Die Standardeinstellungen für die systema-

Lösung Nr.	Mittelwert \bar{x}	Std.abw. s_v	Schiefe Ψ	Std.abw. s_r	max. Diff. Δ_{max}
1 - OBE2	-7,4 mm	19,9 mm	-0,867 *	3,4% *	13,1%
2 - OBE2	3,8 mm	7,8 mm	0,517 *	1,5%	3,1%
3 - OBE2	-0,2 mm	6,4 mm	0,180	1,5%	3,5%
4 - OBE2	-3,3 mm	7,5 mm	-0,321 *	1,6%	2,9%
5 - WTZR, ...	1,9 mm	14,9 mm	-0,201	0,8%	2,1%
6 - WTZR, ...	0,1 mm	9,3 mm	-0,102	1,0%	2,2%
7 - WTZR, ...	-0,5 mm	10,4 mm	-0,249	0,8%	2,5%
8 - WTZR, ...	0,1 mm	9,3 mm	-0,092	0,9%	2,3%
9 - GOPE	0,1 mm	5,5 mm	-0,354 *	2,6% *	5,5%
10 - GOPE	1,7 mm	8,5 mm	0,160	2,5% *	7,2%
11 - GOPE	1,1 mm	7,1 mm	0,972 *	3,5% *	8,9%
12 - GOPE	-0,1 mm	6,3 mm	0,176	2,7% *	8,1%
13 - GOPE	0,1 mm	5,5 mm	-0,555 *	2,3% *	5,3%

Tabelle 5.7: Darstellung der Kenngrößen für die Betrachtung der Verbesserungen ausgewählter Positionierungsexperimente. Lösungen, bei denen s_r einen Wert von 2,3% übersteigt, wurden als »auffällig« markiert, ebenso wenn die Asymmetrie der Verteilung eine Schiefe von 0,3 übersteigt.



Abbildungen 5.5a-h: Histogramme der Verbesserungen ausgewählter Positionierungsexperimente.

Beschreibung der Lösung	Schiefe Ψ	Standardabweichung s_r	max. Differenz Δ_{\max}
[1] IF1A-OBE2, L_1 T: NWM, I: AIM	0,607	1,6%	4,1%
[2] IF1A-OBE2, $L_{3;2}$ T: NWM, I: AIM	-0,696	1,7%	4,0%
[3] IF1A-OBE2, $L_{4;3}$ T: NWM, I: AIM	-0,510	1,2%	3,1%
[4] IF1A-OBE2, $L_{5;4}$ T: NWM, I: AIM	-0,338	1,1%	2,4%
[5] IF1A-BZRG+WTZR, $L_{5;4}$ T: NWM, I: AIM	-0,033	1,2%	3,4%
[6] IF1A-BZRG+WTZR, $L_{5;4}$ T: NWM, I: CMC; no fix!	-0,154	1,0%	2,5%
[7] IF1A-BZRG+WTZR, $L_{9;7}$ T: NWM, I: CMC	-0,004	1,3%	3,7%
[8] IF1A-BZRG+WTZR, $L_{77;60}$ T: NWM, I: \times ; no fix!	-0,042	1,0%	3,0%
[9] IF1A-GOPE, $L_{3;2}$ T: NWM, I: CMC; no fix!	-0,022	1,5%	3,3%
[10] IF1A-GOPE, $L_{5;4}$ T: NWM, I: IONEX	0,157	1,3%	2,7%
[11] IF1A-GOPE, $L_{9;7}$ T: NWM, I: IONEX	0,201	0,9%	2,3%
[12] IF1A-GOPE, $L_{9;7}$ T: NWM, I: CMC	0,209	1,1%	2,6%
[13] IF1A-GOPE, $L_{77;60}$ T: NWM, I: \times ; no fix!	-0,005	1,3%	2,4%

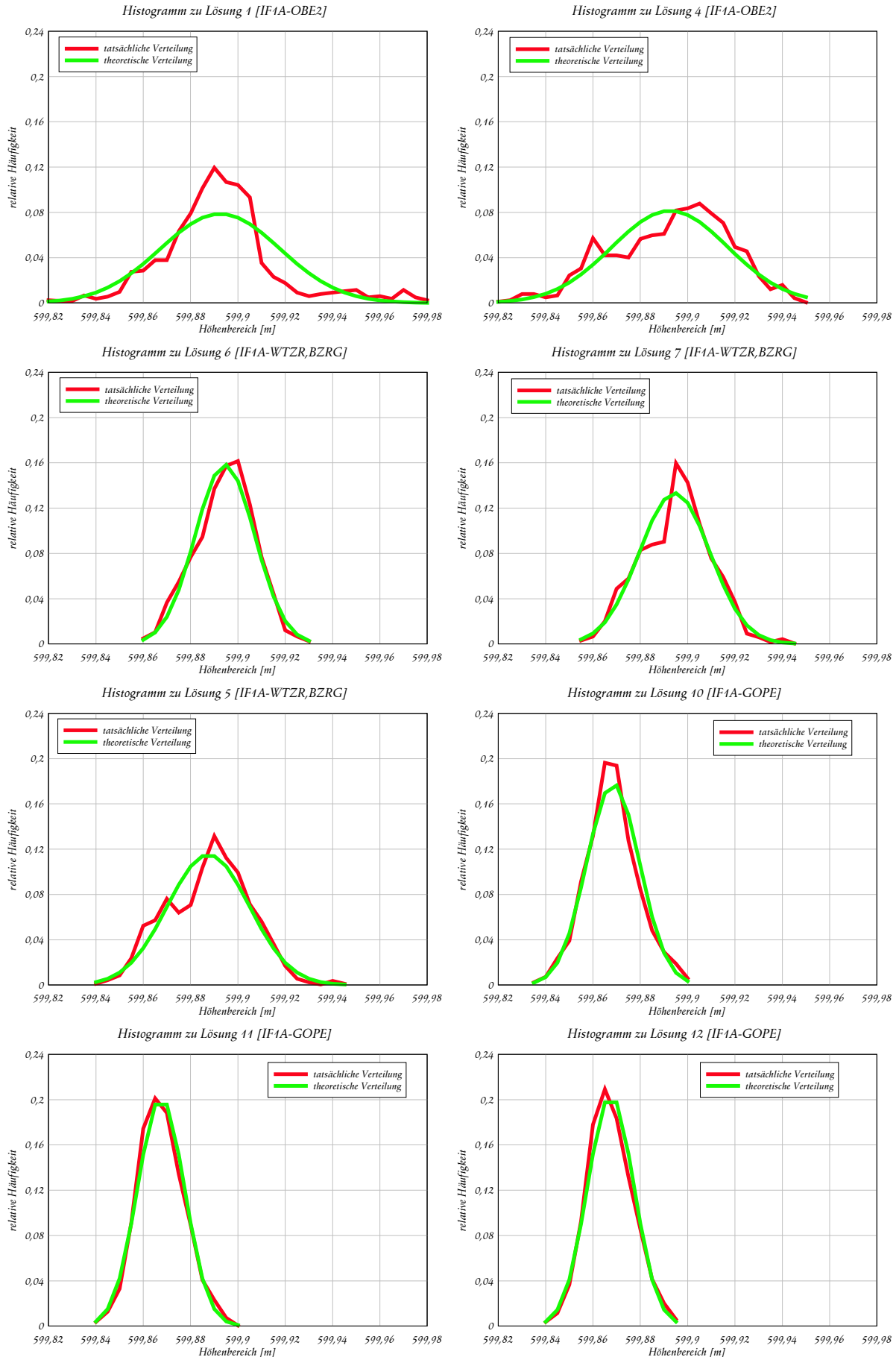
Tabelle 5.8: Darstellung ausgewählter Kenngrößen für die Betrachtung der Höhenverteilungen.

tischen Fehler durch die Troposphäre betragen jeweils 1,1 cm für die hydrostatische und feuchte Komponente in Zenitrichtung. Diese Werte können als repräsentative Durchschnittsfehler bei Verwendung des angesprochenen numerischen Wettermodells angesehen werden¹³. Über die zu erwartende Genauigkeit der Ionosphärenkorrekturen bei Verwendung der IONEX-Karten liegen keine gesicherten Erkenntnisse vor. Die gewonnenen Erfahrungen deuten jedoch darauf hin, dass die in den Dateien enthaltenen Standardabweichungen zu optimistisch sind. Zur reinen Genauigkeit der Daten an den Modellgitterpunkten kommen - ebenso wie bei der Troposphärenmodellierung - noch zusätzliche Unsicherheiten auf Grund der (möglicherweise zu groben) Auflösungen in räumlicher und auch zeitlicher Hinsicht. In diesen Experimenten wurde für die Systematik deshalb behelfsweise ein Mehrfaches der gegebenen Standardabweichungen an den Gitterpunkten angesetzt (zumeist Faktor 3). Bei Nutzung des jährlichen Trendmodells »AIM« wurden die gegebenen Fehlerabschätzungen angenommen, sofern sie größer als die vom Nutzer definierten Standardwerte waren. Da präzise IGS-Bahnen in die Prozessierung eingingen, können die zugehörigen systematischen Fehler als vernachlässigbar gering eingestuft werden. In der Tat ergeben sich Auswirkungen, die selbst bei den längsten Basislinien und den kleinsten virtuellen Wellenlängen 0,01 Zyklen nicht überschreiten. Aus diesem Grund wird ihnen in diesem Rahmen keine weitere Aufmerksamkeit geschenkt.

5.3.2.4.1 Mehrdeutigkeiten

Die Auswirkungen der systematischen Fehler in den Laufzeitverzögerungen für die Troposphäre werden in Abbildung 5.7 für das Netzwerk IF1A-WTZR,BZRG und in Abbildung 5.9 für die lange Basislinie IF1A-GOPE dargestellt (ausgewählte Experimente). Der Referenzsatellit war jeweils PRN 23, durch die Zusätze »a« bzw. »b« werden bei Bedarf die Basislinien eindeutig identifiziert (a: IF1A-WTZR, b: IF1A-BZRG). Auf die unterschiedliche Skalierung der Diagramme sei hingewiesen. Die

¹³ weitere Fehlerbetrachtungen finden sich in KRUEGER, SCHÜLER, HEIN u.a. [2004]



Abbildungen 5.6a-h: Darstellung ausgewählter Verteilungsfunktionen für die Höhenkomponente.

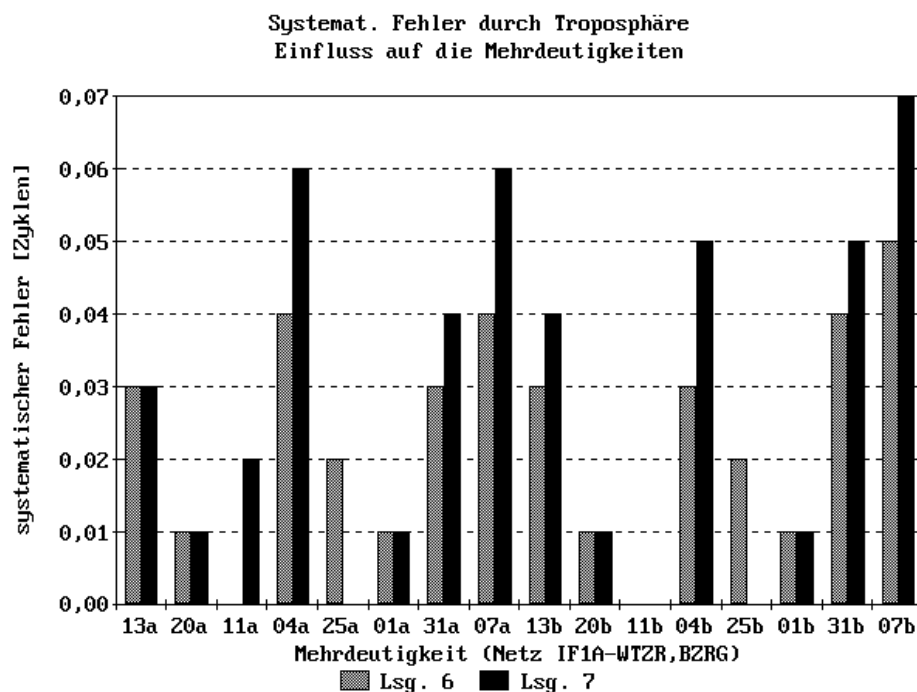


Abbildung 5.7: Auswirkung der abgeschätzten systematischen Fehler in der Troposphäre.

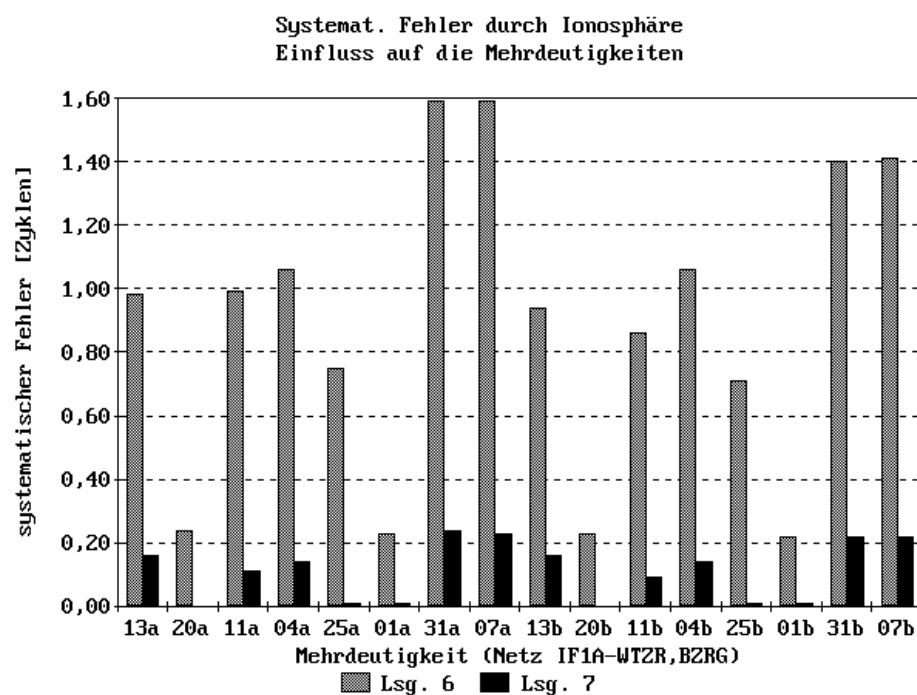


Abbildung 5.8: Auswirkung der abgeschätzten systematischen Fehler in der Ionosphäre.

Abhängigkeit des systematisch wirkenden Troposphärenfehlers von der Basislinienlänge ist im Vergleich klar zu erkennen: Während im Netzwerk IF1A-WTZR,BZRG lediglich Werte von maximal 0,07 Zyklen erreicht werden - und dies folgerichtig für Linie IF1A-BZRG - liegen die Werte für IF1A-GOPE ausnahmslos bei mindestens 0,02 Zyklen oder mehr mit einem Maximalwert von 0,19 Zyklen. Grundsätzlich sind die systematischen Troposphärenfehler - in metrischen Einheiten betrachtet -

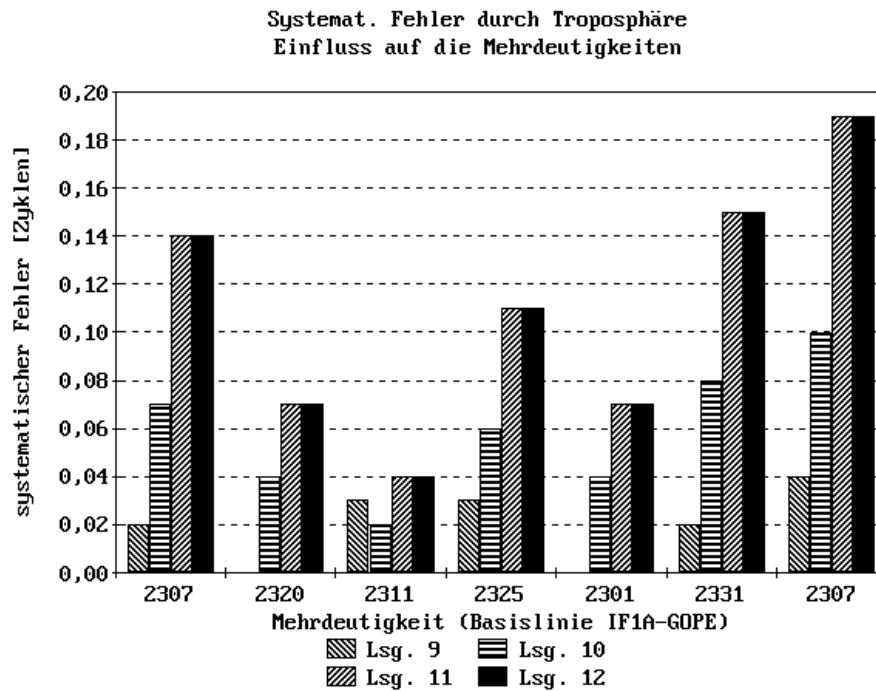


Abbildung 5.9: Auswirkung der abgeschätzten systematischen Fehler in der Troposphäre.

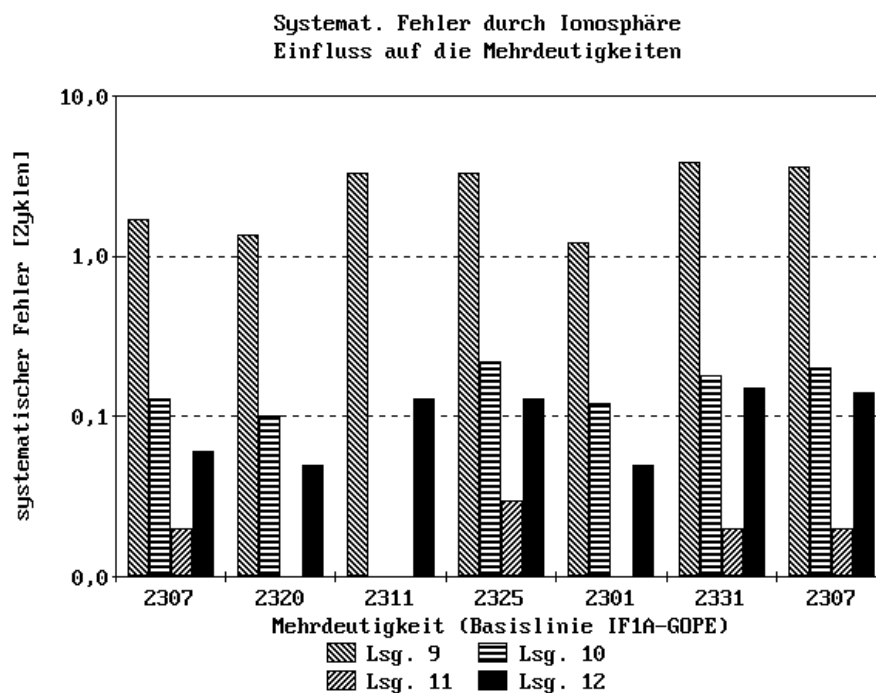


Abbildung 5.10: Auswirkung der abgeschätzten systematischen Fehler in der Ionosphäre.

nicht von der gewählten Linearkombination abhängig¹⁴, doch skaliert er sich unter Ansetzung des individuell verwendeten virtuellen Signals in unterschiedliche Werte, wenn als Einheit die Phasenzyklen verwendet werden. Der Troposphärenfehler kann für IF1A-WTZR,BZRG noch als grundsätzlich unproblematisch bezeichnet werden. Mit Fehlerbeträgen von nahe 0,2 Zyklen erreicht er für

¹⁴ Da die Zahlenwerte in den Ausgabedateien nur auf 0,01 Zyklen genau angegeben werden, können in den Diagrammen bei kleinen Werten unter Umständen aber identische Werte erscheinen.

Systematische Fehlerwirkung auf die Position

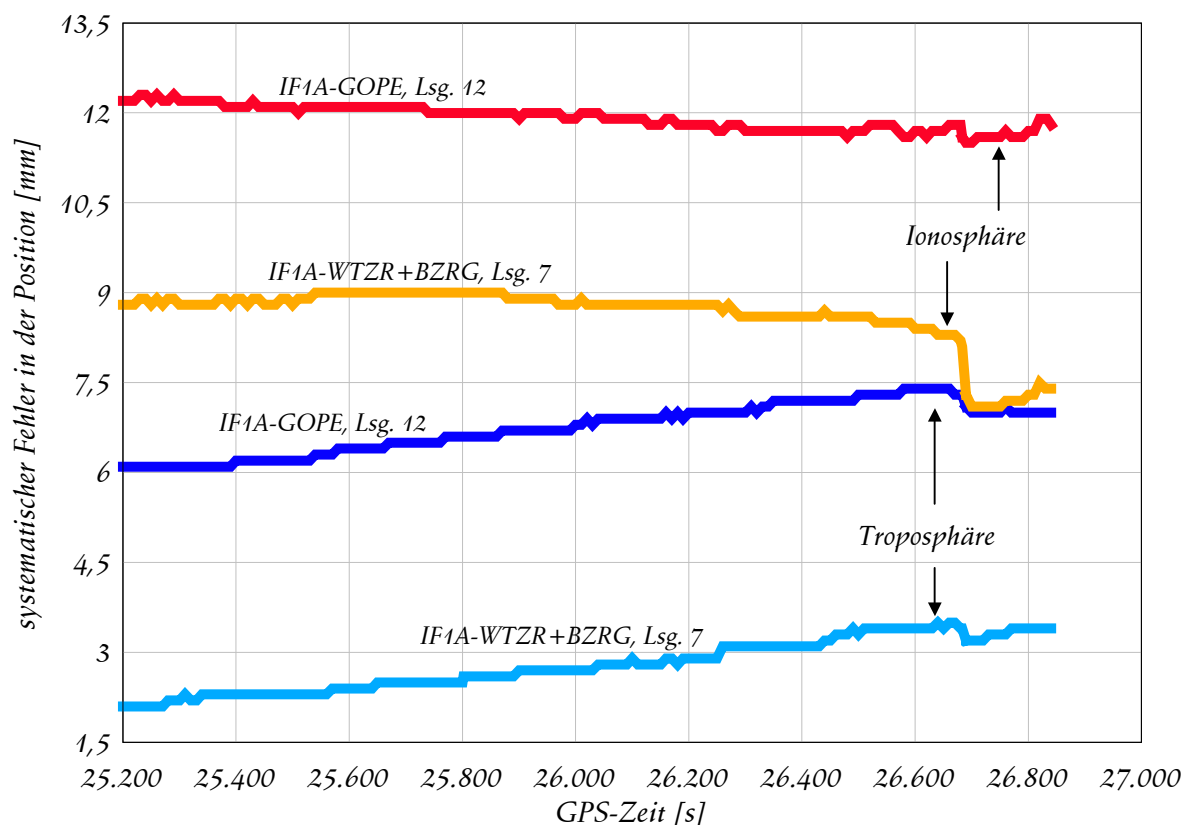


Abbildung 5.11: Systematische Fehlerwirkung auf die Positionsbestimmung durch Troposphäre und Ionosphäre für zwei ausgewählte Experimente.

IF1A-GOPE aber einen Grenzbereich, der in bestimmten Situationen bereits eine Fixierung nicht mehr erlaubt¹⁵.

Die Auswirkung der Ionosphäre auf die Mehrdeutigkeiten folgt in Abbildung 5.8 für das Netz IF1A-WTZR,BZRG (logarithmische Skalierung) sowie Abbildung 5.10 für IF1A-GOPE. Von den dargestellten Experimenten sind insbes. die Lösungen 6, 7, 9 und 12 interessant, da dort die Kombination von Strecken- und Phasenmessungen zur Ermittlung der Ionosphärenkorrektur benutzt wurde. Dieses Verfahren ist unabhängig von der Länge der Basislinie und basiert komplett auf Messwerten, erfordert also keinen Einsatz eines Korrekturmodells. Lösungen 6 und 9 zeigen allerdings starke systematische Einflüsse, so dass konsequenter Weise keine Festsetzung der Mehrdeutigkeiten auf Ganzzahlwerte erfolgte. Lösung 9 basiert auf der Nutzung der Linearkombination $L_{3;21}$, die den verbleibenden Ionosphärenfehler nicht in ausreichendem Maße kompensieren kann. Dies ist ebenfalls bei Lösung 6 der Fall, wo aber immerhin $L_{5;4}$ benutzt wird, die eine deutlich durchgreifendere Reduktionswirkung besitzt, doch verbleiben auf Grund einer ungenaueren Bestimmung der CMC-Werte immer noch zu starke Restfehler. Lösungen 7 und 12 verwenden $L_{9;7}$. Diese Linearkombination kann die Ionosphäre substanziell mitigieren, hat aber den Nachteil einer bereits recht geringen virtuellen Wellenlänge. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass sich die systematischen Fehlereinflüsse auf die Mehrdeutigkeiten noch unterhalb kritischer Schwellwerte befinden.

5.3.2.4.2 Positionen

Nach einer erfolgreichen Fixierung der Mehrdeutigkeiten wirken systematische Fehler weiterhin, und pflanzen sich beispielsweise auch in die Zielparameter fort. Abbildung 5.11 illustriert diese Tatsache

¹⁵ Auch systematische Fehler deutlich kleiner als 0,5 Zyklen (»Rundungsgrenze«) können bereits zu Fehlfixierungen führen, was insbesondere vom Grad der jeweils vorhandenen Korrelation abhängt.

für ein Beispiel aus dem Netzwerk IF1A-WTZR,BZRG sowie die Basislinie IF1A-GOPE. Der durch die Ionosphäre bewirkte systematische Anteil auf die 3-D-Position wird in roten Farbtönen zum Ausdruck gebracht, der durch die Troposphäre bedingte in blauen Farbtönen. Deutlich wird, dass die Wirkung des troposphärischen Fehlers in Abhängigkeit von der Entfernung fast konstant ca. 4 mm für IF1A-GOPE größer ist im Vergleich zu IF1A-WTZR,BZRG. Der Unterschied bzgl. des Ionosphärenfehlers ist ein wenig geringer, liegt insgesamt mit 1,2 cm für IF1A-GOPE höher als der Troposphärenfehler. Bei Lösung 7 ändert er sich zum Ende des Beobachtungszeitfensters abrupt auf Grund eines untergehenden Satelliten. Die sichtbaren - näherungsweise linearen - Trends in den Fehlerkurven gehen auf die langsame Änderung der Satellitengeometrie und die damit einhergehende Änderung der Auswirkung der systematischen Fehler in den Beobachtungen auf die Positionen zurück. Sie halten sich jedoch für die meisten Anwendungen in der präzisen kinematischen Positionierung in einem durchaus vertretbaren Rahmen, so dass die Verwendung von Basislinien mit Längen von bis zu 300 km Länge grundsätzlich praktikabel erscheint.

5.4 Zusammenfassung und abschließende Bemerkungen

Die in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Auswertemethoden wurden beispielhaft über sehr kurze, kurze, mittellange und lange Basislinien bzw. Netzwerke angewendet und damit einer ersten Prüfung unterzogen. An Hand einer Null-Basislinien-Messung zeigte sich, dass die während dieser Experimente gesammelten Messdaten eines typischen Zweifrequenz GPS-Empfängers eine statistische Verteilung ähnlich der Gauß-Verteilung (Normalverteilung) aufweisen. Diese Aussage bezieht sich aber nur auf die Unsicherheiten durch das Tracking des Empfängers, also auf die internen Messvorgänge. In der Praxis wirken weitere externe Fehlergrößen wie Mehrwege-Fehler, die - je nach Umgebung - eine Abweichung von der Normalverteilung bewirken können.

Die Daten einer Referenzstation müssen für die kinematische Positionierung nicht mit einer gleich hohen Frequenz aufgezeichnet werden, wie dies eventuell beim Rover der Fall ist, sondern können interpoliert werden. Bei einem Aufzeichnungsintervall von etwa 2 bis 5 s erreicht der Interpolationsfehler grundsätzlich keine kritischen Werte. Bei den im Abstand von 30 s vorliegenden Daten des IGS und EUREF Netzwerkes kann die Interpolation ebenfalls angewendet werden, doch muss dort bereits mit einem spürbaren Genauigkeitsverlust gerechnet werden. Grundsätzlich wird die statistische Verteilung durch die Interpolation nicht geändert.

Die kinematischen Positionierungsexperimente erbrachten für sämtliche Basislinien bis zu einer Entfernung von mehr als 300 km präzise Ergebnisse. Bei Anwendung der CMC-Methode zur Ionosphärenkorrektur muss jedoch festgestellt werden, dass der Einsatz von $L_{4;3}$ und $L_{5;4}$ nur bei präzisen Streckenmessungen Aussicht auf Erfolg hat und in anderen Fällen ein Rückgriff auf $L_{9;7}$ erfolgen muss. Wünschenswert wäre eine volle Nutzbarkeit von $L_{4;3}$ bzw. $L_{5;4}$ wegen deren größerer virtuellen Wellenlänge. Wenn somit nicht über sehr lange Basislinien positioniert wird, so ist zunächst die Prüfung des Einsatzes eines Ionosphärenmodells sinnvoll, bevor dem CMC-Ansatz der Vorzug gegeben wird.

6. Radaraltimeter-Kalibrierung mit GPS-Bojen

Der im März 2002 von der Raumfahrtorganisation ESA gestartete Umweltsatellit ENVISAT verfügt - neben einer Reihe weiterer Sensoren - über ein Radaraltimeter, das den Höhenunterschied zwischen Meeresoberfläche und Satellit mit einer Präzision von wenigen Zentimetern messen kann. Da derartige Messgeräte einen systematischen Fehler aufweisen, der nicht zuvor mit Hilfe von Laborversuchen bestimmt werden kann, muss eine aufwändige Messkampagne zur Bestimmung der Gerätekonstanten durchgeführt werden. In diesem Kapitel soll ein Verfahren vorgestellt werden, das es erlaubt, den Fehler des Radaraltimeters unter Nutzung von GPS-Hochseebojen zu bestimmen. Neben einer technischen Beschreibung des entwickelten Messsystems liegt die Konzentration in diesem Kapitel auf den Aspekten der kinematischen Analyse der GPS-Daten, wobei die exakte Höhenbestimmung von besonderer Bedeutung ist.

6.1 Planung und Technische Beschreibung

6.1.1 Grundlegendes und Vorteile des Verfahrens

Vor der wissenschaftlichen Nutzung der Radaraltimeterdaten des Satelliten ENVISAT, beispielsweise zum Studium des marinen Schwerfeldes sowie der ozeanischen Strömungen und Gezeiten, ist die genaue Kalibrierung dieses Sensors unabdingbar. Das Grundprinzip ist denkbar einfach: Wenn exakte Informationen über die tatsächliche Meereshöhe während eines Überfluges des Satelliten vorliegen und gleichzeitig die präzise Position von ENVISAT bekannt ist, so kann die Sollstrecke zwischen Meeresoberfläche und Satellit ermittelt und mit der Altimetermessung verglichen werden. Die Orbitbestimmung wird in diesem Fall mit Hilfe des operationellen, französischen Dopplersystems DORIS sichergestellt¹. In der Nachbearbeitung können so die Satellitenpositionen mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern bestimmt werden.

Verschiedene Varianten bzgl. der Bestimmung der instantanen Meeresoberfläche sind denkbar. Beispielsweise bilden Gezeitenpegel eine einfache Möglichkeit der Meereshöhenerfassung. Neben dieser klassischen Methode basieren die wichtigsten Alternativen auf der Nutzung der Satellitennavigation, insbesondere dem GPS. So wäre beispielsweise die Nutzung auf vorgeschobenen Leuchttürmen denkbar² oder aber die Nutzung von Bojen als Plattformen für die GPS-Empfänger. Letztere Variante kam bei der ENVISAT Altimeter-Kalibrierung durch Realisierung zweier Ansätze zum Einsatz: Während eine Arbeitsgruppe an der Universität von Barcelona GPS-Messungen auf Minibojen durchführte, die bei Bedarf an Ort und Stelle ausgesetzt und nach dem Überflug des Satelliten wieder eingeholt wurden, unternahm das Institut für Erdmessung und Navigation der Universität der Bundeswehr München den Versuch, hochseetüchtige Bojen dauerhaft während der gesamten Messkampagne an einem bedeutsamen Kreuzungspunkt des Altimeter-Satelliten zu positionieren.

Durch eine dauerhafte Verankerung kann die Wirtschaftlichkeit des Projektes erhöht werden. Die GPS-Trägerphasen-Lösungen gewährleisten eine Höhengenaugkeit im Bereich von ungefähr 1 bis 3 cm, allerdings gestaltet sich die Höhenreduktion im Vergleich zu den nicht autark arbeitenden Minibojen problematischer, da die vorhandenen Exzentrizitäten auf Grund der verwendeten größeren Bojen zwangsläufig einen stärkeren Einfluss auf das Fehlerbudget haben werden.

Im Vergleich zur Nutzung der Gezeitenpegel kann bei dem Einsatz von Hochseebojen auf einen wichtigen Vorteil verwiesen werden: Die meisten der für die ENVISAT Kalibrierung genutzten Pegelstationen befinden sich in Küstennähe, wo es zu Aufstauwirkungen der Wassermassen kommt, die gegenwärtig zum Teil nur schwer modelliert werden können. Vorgelegte Ergebnisse³ zeigen deutliche systematische Fehler in den angebrachten geophysikalischen Korrekturen bei den Gezeitenpegeln auf, die zum Teil auf derartige Aufstauwirkungen zurückgeführt werden können. Die mit GPS

¹ DORIS = Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite; siehe <http://ids.cls.fr/cgis/events.cgi>

² Diese Methode wurde in der Vergangenheit durch FRANCIS u.a. [1993] auf das ERS-1 Altimeter angewendet.

³ Es sei auf die entsprechenden Präsentationen während der Konferenz „ENVISAT Validation Review“ (ESRIN, Frascati, Italien, 9. bis 13. Dezember 2002) verwiesen.

ausgerüsteten Hochseebojen hingegen können an Orten in der offenen See positioniert werden, die bezüglich der angesprochenen Problematik einfach zu modellieren sind. Aus diesem Grunde sei die Bedeutung des hier vorgestellten Ansatzes und seine Realisierung an dieser Stelle ausdrücklich betont.

Neben der Ableitung präziser Meereshöhen an einem ENVISAT Kreuzungspunkt unter Nutzung einer nahegelegenen, für dieses Projekt installierten Referenzstation, wurde auch der Versuch unternommen, die Bojen über lange Basislinien kinematisch zu positionieren. Diese Methode würde - falls sie zu ausreichend genauen Höhenwerten führt - die Wirtschaftlichkeit weiter erhöhen, da die Infrastruktur bzgl. der Referenzstationen ausgedünnt werden könnte bzw. mehr Kreuzungspunkte zur Kalibrierung benutzt werden könnten. Da in diesem Projekt die Auswertung über lange Basislinien noch experimentellen Charakter hatte, war die Einrichtung einer in Nähe der Bojen gelegenen GPS-Referenzstation in jedem Falle vorgesehen. Sie wurde gleichsam auch für die Aktivitäten zur Kalibrierung des ENVISAT-Radiometers genutzt⁴, da über NAVSTAR GPS genaue troposphärische Laufzeitverzögerungen bzw. der integrierte Wasserdampfgehalt über der GPS-Antenne durch Mitschätzung im Rahmen der Routineprozessierung gewonnen werden können.

6.1.2 Missionsplanung

Neben dem Institut für Erdmessung und Navigation (Universität der Bundeswehr München) beteiligten sich Wissenschaftler des Instituts für planetare Geodäsie (Technische Universität Dresden) an dem Projekt, die im Rahmen eines optionalen Arbeitspaketes in Bojennähe Druckpegelmessungen auf dem Meeresboden durchführten. In logistischer Hinsicht wurden die Arbeitsgruppen durch Mitarbeiter des IMEDEA (Institut Mediterrani d'Estudis Avançats, Universität der Balearen) unterstützt, welche für die Auslegung, Überwachung und Einholung der Bojen verantwortlich waren.

6.1.2.1 Terminplanung

Das Projekt stand von Anfang an unter einem hohen Zeitdruck. Es wurde im Januar 2001 mit der Vorstellung des technischen Entwurfes bei der ESA-Forschungseinrichtung ESTEC in den Niederlanden begonnen. Der auf diesem Treffen avisierte Zeitplan sah einen Beginn der Messkampagne bereits im Juni/Juli 2001 vor. Im März des Jahres wurde das Zielgebiet in Augenschein genommen. Der Zeitplan konnte jedoch nur noch schwerlich eingehalten werden, da die Bereitstellung finanzieller Mittel erst im Mai erfolgte. Durch die missglückte Weltraum-Mission im August 2001, bei welcher der Relais-Satellit Artemis auf Grund einer Funktionsstörung in der Oberstufe der Trägerrakete Ariane-5 zunächst in einer zu niedrigen Umlaufbahn ausgesetzt werden musste, entspannte sich der Zeitplan in akzeptabler Art und Weise, denn der schwere Satellit ENVISAT war auf eine leistungsstarke Ariane-5 als Trägerrakete ausgelegt. Die Raketentriebwerke mussten nun jedoch über Monate hinweg intensive Untersuchungen und Testprozeduren durchlaufen, so dass ENVISAT schließlich erst im März 2002 auf seinen Weg ins All gebracht werden konnte. Fast zur gleichen Zeit erfolgte dann auch die Auslegung der Bojen. Die Dauer der Messphase verlängerte sich auf Bitten der ESA von ursprünglich 6 auf insgesamt knapp 9 Monate.

6.1.2.2 Kriterien zur Auswahl des Kalibriergebietes

Das von der Europäischen Raumfahrtagentur ESA angedachte Konzept basiert auf einer Konzentration sämtlicher Kalibrier-Aktivitäten in einer bestimmten Region, die deutliche Vorteile gegenüber alternativen Gebieten aufweisen soll. Zu diesen im Findungsprozess berücksichtigten Kriterien zählen beispielsweise ein dichtes Netz von Satelliten-Laser-Stationen - um die Orbitgenauigkeit von ENVISAT den hohen Ansprüchen gemäß optimieren zu können - sowie ein dichtes Netz von Gezeitenpegeln, welche trotz der angedeuteten Nachteile ein wichtiges Rückgrat der Kalibrier-Aktivitäten bilden sollten. Gezeiten und Strömungen müssen genau modelliert werden können und grundsätzlich - ebenso wie die mittlere Wellenhöhe im Gebiet - eine möglichst geringe Amplitude aufweisen. Das marine Geoid muss in seiner Struktur glatt und mit hoher Genauigkeit bekannt sein. Weiterhin wird ein enges Netz meteorologischer Sensorstationen mit Schwerpunkt auf Luftdruck und Wasserdampf

⁴ siehe dazu MARTELLUCCI und SCHÜLER [2004] sowie SCHÜLER [2004]

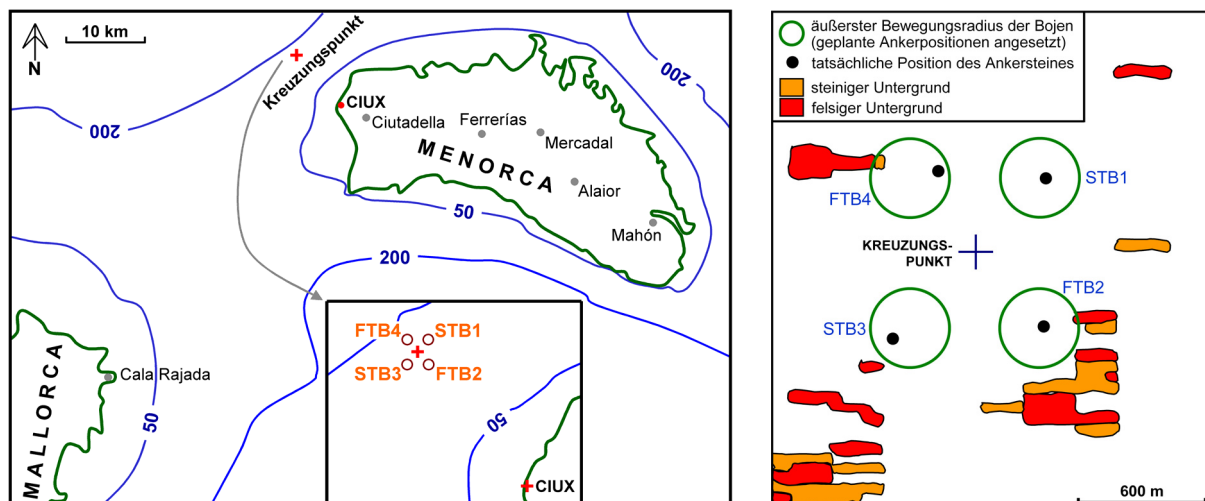


Abbildung 6.1a-b: Die Kartenskizze zeigt die Insel Menorca sowie den östlichen Teil Mallorcas. Das Kalibriergebiet befindet sich nordwestlich der Stadt Ciutadella, wobei die Sollpositionen der GPS-Bojen symmetrisch um den Kreuzungspunkt angeordnet sind (FTB: Fasstonne, STB: Solarleuchttonne). Die Entfernung zur Referenzstation »CIUX« liegt im Bereich zwischen 8 und 9 km. Die rechte Abbildung zeigt die Beschaffenheit des Meeresbodens mit den maximalen Aktionsradien (Kreise) der Bojen bei Annahme der geplanten Bojenstandorte sowie den tatsächlichen Positionen der Ankersteine nach Auslegung der Bojen im März 2002.

sowie die Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger und ausreichend hochauflösender Atmosphärenmodelle gefordert.

Die hier angesprochenen Kriterien bilden eine nur unvollständige Liste der als wichtig eingestufteten Rahmenbedingungen⁵. Nicht nur aus logistischen Gründen wurde ein zu Europa gehörendes Gebiet gefordert, unter welchen das westliche Mittelmeer die Anforderungen am besten zu erfüllen schien und schließlich ausgewählt wurde. Nunmehr verbieth die Suche nach einem geeigneten Ort zur Aussetzung der GPS-Bojen. In diesem Zusammenhang waren zwei wesentliche Gesichtspunkte zu beachten: Da eine hochgenaue kinematische GPS-Trägerphasen-Lösung zu allen Überflügen garantiert werden musste, ergab sich zur Reduktion atmosphärischer Störeinflüsse die Notwendigkeit, eine Referenzstation in der Nähe der Bojen zu installieren. Die Distanz sollte dabei weniger als 20 km betragen, so dass die Lösung der Phasen-Mehrdeutigkeiten nicht unnötig verkompliziert wird. Weiterhin durfte die Meerestiefe einen bestimmten Grenzwert nicht überschreiten, da andernfalls eine sichere Verankerung der Plattformen nicht mehr zu gewährleisten ist. Als Grenzwert wurden 150 m festgelegt.

6.1.2.2.1 Kreuzungspunkt und Bojenpositionen

Da während einer Intensivmessphase von weniger als 9 Monaten nur eine geringe Zahl an Überflügen über einem bestimmten Punkt möglich ist, muss idealer Weise ein Kreuzungspunkt gefunden werden, bei dem sich die Bodenspuren von aufsteigenden und absteigenden Knoten des Satelliten ENVISAT schneiden. Ein solcher Ort, der sich in offener See und akzeptabler Meerestiefe befindet, auf der anderen Seite aber auch in weniger als 10 km Entfernung die Errichtung einer Referenzstation zulässt, findet sich an der Nordwestküste der zu Spanien gehörenden Insel Menorca. Abbildung 6.1a zeigt den Kreuzungspunkt (CROP) und die symmetrisch um diesen Punkt angeordneten nominellen Positionen der 4 Forschungsbojen (Solarleuchttonne STB1, Fasstonne FTB2, STB3 und FTB4) sowie den Standort der Referenzstation (CIUX). Die Diagonale zwischen den Bojen FTB2 und FTB4 beträgt dabei knapp 1,6 km, womit sich alle Bojen im Inneren des genutzten Altimeter-Fußpunktes befinden, der je nach geografischer Breite, Flughöhe und Meeresoberflächenrauheit von etwa 3 bis 7 km variiert.

⁵ weitere Details finden sich in FRANCIS und ROCA [2000]

6.1.2.2 Tiefenprofile

Mitte März 2001 befuhren Kollegen des IMEDEA die auf- und absteigenden Bodenspuren des Satelliten um den ausgewählten Kreuzungspunkt und nahmen das Gebiet bathymetrisch auf, da vorhandenes Kartenmaterial als nicht ausreichend zuverlässig eingestuft wurde. Die gemessenen Tiefenprofile zeigen, dass im Bereich von einem Kilometer um den Kreuzungspunkt mit einer Tiefe von 120 bis maximal 140 m zu rechnen ist. Somit ist der Einsatz konventioneller Stahlketten als alleiniges Verankerungssystem nicht mehr möglich, da die Masse des Stahls die Bojen unter Wasser ziehen würde. Der im Abschnitt 6.1.3.1.1 beschriebene Einsatz von Textilseilen ermöglicht dennoch die dauerhafte Befestigung der Tonnen und würde grundsätzlich die Verankerung in noch größeren Tiefen erlauben.

6.1.2.3 Beschaffenheit des Meeresbodens

Bei der Verwendung von Textilseilen muss besonderes Augenmerk auf die Beschaffenheit des Meeresbodens gelegt werden, da sich Teile der Seile auch auf dem Untergrund bewegen und im Falle des Vorhandenseins scharfkantiger Gesteine unter Umständen innerhalb kurzer Zeit Schaden nehmen können. Abbildung 6.1b verdeutlicht die Seebodenbeschaffenheit gemäß Angaben von RUIZ [2001]. Die um die nominellen Bojenpositionen eingezeichneten Kreise stellen die maximalen Bewegungsfreiräume der Bojen dar. Lediglich im südöstlichen Bereich könnte die Boje FTB2 steinigtes Gebiet tangieren, allerdings nur an der äußersten Peripherie, wo die Textilseile selbst nicht mehr auf dem Meeresboden scheuern können. Eine ähnliche Situation ergäbe sich für Boje FTB4, wenngleich das Gebiet im nordwestlichen Bereich nur punktuell felsig erscheint, wobei die Situation dort durch die Verlagerung der tatsächlichen Ankersteinposition in Richtung Osten weiter entschärft wurde.

6.1.3 Technische Aspekte

Die folgenden Abschnitte fassen nicht nur die GPS-bezogenen Details zusammen, sondern sollen dem Leser einen Gesamtüberblick über die zur Durchführung wichtigen Komponenten des Messsystems von der Computer- über die Kommunikations- bis hin zur Sensortechnik geben. Abschließend wird das Systemdesign abschließend kritisch beurteilt und es werden Verbesserungsvorschläge für künftige Missionen dieser Art unterbreitet.

6.1.3.1 Hochseebojen

Die Forschungs-Bojen müssen den Sicherheitskriterien der zuständigen Hafenbehörden genügen. Da sie in einem befahrenen Gebiet des Mittelmeeres stationiert werden sollten, wurde - neben Seelicht und Sichtzeichen - auch ein Radarreflektor gefordert. Das ursprünglich angedachte System aus zwei verhältnismäßig großen Fasstonnen (FTB2/4) und zwei kleinen »Wellenreitern« (Wave Rider) konnte aus diesem Grunde nicht realisiert werden, da nur ersterer Bojentyp die geforderten Sicherheitseinrichtungen aufwies. Bedauerlicher Weise konnten von diesem Typ keine weiteren Bojen bereitgestellt werden, so dass mit zwei Solarleuchttonnen (STB1/3) vom Modell »FTW71« auf alternative Träger zurückgegriffen wurde. Bojen dieses Typs werden zum Teil im Ostseebereich eingesetzt. Trotz der Versicherung der zuständigen Behörden erwiesen sie sich vor Menorca jedoch nicht als ausreichend hochseetüchtig und konnten deshalb keinen bemerkenswerten Beitrag zur Kalibrierkampagne leisten. Nachfolgend wird deshalb ausschließlich auf die »Großen Fasstonnen« eingegangen.

Eine dieser vom Wasser- und Schifffahrtsamt Cuxhaven bereitgestellten Forschungsbojen mit der Kennung »FTB2« zeigt Abbildung 6.2b. Zwar erscheinen die 2300 kg schweren Tonnen in ästhetischer Hinsicht nur in eingeschränktem Maße einladend, da ihr wesentlicher Bestandteil aus einem zylindrischen Hohlkörper mit einer Länge von 3 m und einem Durchmesser von 2 m gebildet wird, daher der Name »Fasstonne«, doch erwiesen sie sich für die beabsichtigte Anwendung als sehr gut geeignet. In der Mitte wird die Seeleuchte mit integriertem Radarreflektor aufgesetzt. Sie verfügt über eine separate Energieversorgung durch Akkumulatoren, die mit Hilfe der beiden seitlich befestigten Solarzellen bei Tageslicht wieder aufgeladen werden. Die auf der linken Seite der Tonne sichtbare Plattform für die Bordelektronik wurde nachträglich angebracht. Auf dieser Bojen- seite

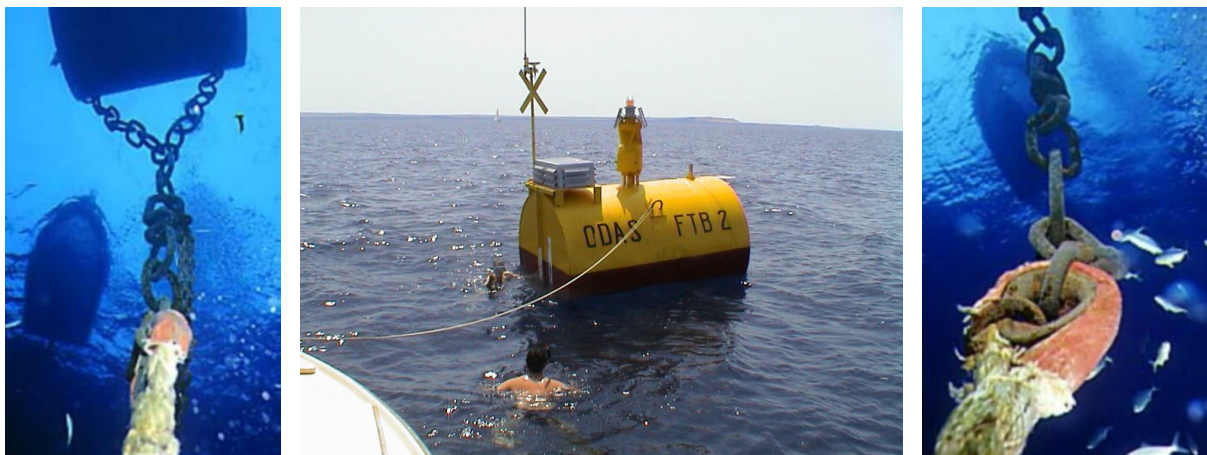


Abbildung 6.2a-c: Große Fasstonne FTB2 im Einsatz vor Menorca. Die links abgebildete Unterwasseraufnahme zeigt den »Hahnepot« mit dem abwärts angeschlossenen Textilseil, dessen oberes Ende mit Kausche in der rechten Aufnahme deutlicher sichtbar werden.

befinden sich auch das Sichtzeichen mit Telemetrie- und GPS-Antenne sowie - an der Außenseite angebracht - die Drucksensorstange zur Bestimmung der Eintauchtiefe.

6.1.3.1.1 Verankerung und Stabilisierung

Da nicht nur der Bojenkörper den Bedingungen rauer See standhalten muss, sondern das Messsystem auch seine Position innerhalb gewisser Grenzen beibehalten soll, kommt der Verankerung besondere Bedeutung zu. Wie bereits in Abschnitt 6.1.2.2.2 angedeutet wurde, ist die Verwendung konventioneller Stahlketten auf Grund der Meerestiefe von mehr als 100 m nicht praktikabel, da die Gewichtskraft der Kette auf die Boje zu groß wäre. Alternativ kann der Einsatz von Schwimmkörpern angedacht werden, welche durch ihren Auftrieb die schweren Stahlketten anheben und so die auf die Forschungstonnen wirkenden Kräfte reduzieren würden. Im Rahmen dieses Projektes wurde jedoch durch die Verwendung hochfester Textilseile ein anderer Weg beschritten.

Der Durchmesser des gewählten Seiles vom Typ »TI-FLEX HP« beträgt 56 mm. Mit einer Masse von lediglich 1,82 kg/m weist dieses Verankerungsseil eine Dichte von 0,74 kg/dm³ auf und ist - in trockenem Zustand - somit leichter als das Meerwasser. Trotz des leichten Eigengewichts kann das aus einer Kombination von Polyester und Polypropylen bestehende Textilseil als hochgradig belastbar bezeichnet werden: Zwei voll bestückte Fasstonnen könnten an der Luft an den Seilen angehängt werden ohne die maximale Bruchlast überhaupt zu erreichen.

Um die Zugkräfte auf die Bojen zu verringern bzw. ihnen möglichst viel Bewegungsraum zuzugestehen, wurden 250 m lange Seile benutzt, die an ihren Enden durch sog. »Kauschen« - Metalleinlagen zum Schutz vor Abrieb, siehe auch Abbildung 6.2c - verstärkt sind. Mit dem Ankerstein ist als Vorläufer zum Schutz des Textilseils eine konventionelle Stahlkette verbunden, an welche dann das Seil angehängt wird. Bojenseitig wird ähnlich vorgegangen: Die dort benutzte Stahlkette wird mit ihren Enden in die beiden Befestigungen an der Bojenunterseite eingehängt. Sie weist dementsprechend - wie in Abbildung 6.2a ersichtlich - eine V-Form auf und wird auch als »Hahnepot« bezeichnet. Für die Lagestabilisierung der Boje spielt diese schwere Kette eine entscheidende Rolle. Aus dem Volumen der Forschungstonne von mehr als 9,4 m³ folgt ein spezifisches Gewicht von weniger als 0,25 kg/dm³, d.h. der Auftrieb des Trägers ist so stark, dass Reaktionen auf die Wellen prompt und in ihrer Amplitude sehr ausgeprägt erfolgen. Das zusätzliche Gewicht des Hahnepots führt zu einer erwünschten Tiefpassfilterwirkung und auf Grund der beidseitigen Aufhängung auch zu einer axialen Stabilisierung bezüglich der Bojenbewegungen.

Das hier beschriebene Verankerungssystem hat sich vor Menorca bewährt. Als kritische Punkte können jedoch die Verbindungen zwischen den einzelnen Ketten, die Schäkel, angesehen werden, bei denen - vermutlich auf Grund der stürmischen Wetterverhältnisse im Frühjahr 2002 - leichte Schäden festgestellt werden konnten, die jedoch nicht zu einer Beeinträchtigung der Mission führten.

6.1.3.1.2 Bordcomputer und Kommunikation

Für die Sensoren und die Bordelektronik wurde eine separate Energieversorgung konzipiert, bestehend aus zwei Solarpanelen mit je 25 W Spitzenleistung, die unmittelbar über den Aufbauten auf der Plattform montiert sind, einem Akkumulator mit einer Kapazität von 60 Ah und einem Solarladeregler mit Unterspannungsschutz, der zu Steuerungs- und Kontrollzwecken mit dem Bordcomputer verbunden ist. Das System wurde so ausgelegt, dass eine Laufzeit von 36 Tagen ohne Aufladung garantiert werden kann. Diese Spezifikation gilt bei einer Leistungsaufnahme von 40 W und der Durchführung eines Messprogramms an jedem dritten Tage mit einer Dauer von jeweils 1,5 h.

Über einen Bordrechner werden die einzelnen Sensoren sowie die Position der Boje kontrolliert und die Datenströme aufgezeichnet sowie zur telemetrischen Übertragung vorbereitet. Das eingebettete Computersystem basiert auf dem PC104-Standard, ist mit einer konventionellen 2,5"-Festplatte bestückt und wird unter dem Betriebssystem MS-DOS betrieben. Der Anschluss der Peripherie-Geräte an das System erfolgt über 6 serielle Schnittstellen. Fast alle zum Betrieb der Bojen nötigen Softwarekomponenten stellen maßgeschneiderte Problemlösungen dar, die auf Grund spezieller Anforderungen eigens für dieses Projekt entwickelt werden mussten. Die Softwaremodule können je nach Bedarf mit Hilfe einer automatischen Update-Funktion über die Funkverbindung aktualisiert werden. Alternativ bietet ein Fernsteuerungsprogramm die Möglichkeit, interaktiv über Datenfernverarbeitung auf dem Bojenrechner zu arbeiten. Während der Intensivmessphase erfolgten insgesamt zwei Software-Uploads, die kleinere Unzulänglichkeiten an der Steuerungssoftware beseitigten.

Über den Mikrocontroller erfolgt die zeitliche Steuerung der Vorgänge sowie eine zusätzliche Kontrolle des Ladezustands der Batterien. Der Controller wird in einem speziellen BASIC-Dialekt programmiert und kann neben seinen Steuerungsaufgaben auch zur Speicherung bestimmter Systemdaten verwendet werden. Die Starttermine für das Messsystem können dabei sehr flexibel in Form einer Tabelle hinterlegt werden, was auf Grund der unterschiedlichen Überflugzeiten des Satelliten sehr sinnvoll ist. Eine Modifikation während des Einsatzes ist durch den Upload einer veränderten Termindatei möglich. Bezüglich der Kontrolle des Energiesystems unterscheidet das entwickelte Programm zwischen drei Zuständen, nämlich dem »Normalbetrieb« (Ladezustand in Ordnung), dem »Notbetrieb« (kritischer Ladezustand - Messaufgaben mit hoher Priorität werden aber noch ausgeführt) und »Standby-Modus« (sehr kritischer Ladezustand - System wird solange nicht mehr hochgefahren, bis wieder eine ausreichende Aufladung der Batterie erfolgt ist).

Da die Hochseebojen nach ihrem Aussetzen nur schwer zugänglich sind, kommt der Telemetrie eine wichtige Bedeutung zu. Über ein Funkmodem werden die aufgezeichneten Daten unter Anwendung des Z-Modem-Protokolls zur nahe gelegenen Referenzstation übermittelt. Auch an Tagen ohne Überflug erfolgt eine tägliche Positionsmeldung an die Station. Datenübertragungsfenster sind je nach Boje (STB1, FTB2, STB3 bzw. FTB4) für 01:00, 02:00, 03:00 bzw. 04:00 Uhr GPS-Zeit festgelegt, d.h. es stehen pro Boje maximal 60 Minuten täglich für den Datenfunk zur Verfügung. Um eine Datenübertragung garantieren zu können, die für Störungen möglichst unanfällig ist, werden Spreizspektrum-Geräte verwendet, für deren Einsatz bei den zuständigen spanischen Behörden eine Son-



Abbildung 6.3: Blick in die Steuerungs- und Aufzeichnungseinheit der Bojen: Oben rechts im Bild ist der GPS-Empfänger (NovAtel OEM3 L₁/L₂, schwarze Box) zu sehen, rechts darunter der Microcontroller zur Steuerung der zeitabhängigen Prozesse (weiß/beige mit blauen Folientasten), links daneben der PC104-Industriecomputer zur Sensorsteuerung und Datenaufzeichnung (die oberste Lage dieses Turms bildet die 2,5"-Festplatte). Unten auf der linken Seite (schwarze Box mit gelben Sicherungen) findet sich der TAROM Laderegler für die Energieversorgung und rechts daneben (kleinere schwarze Box) die Telemetrie-Einheit.

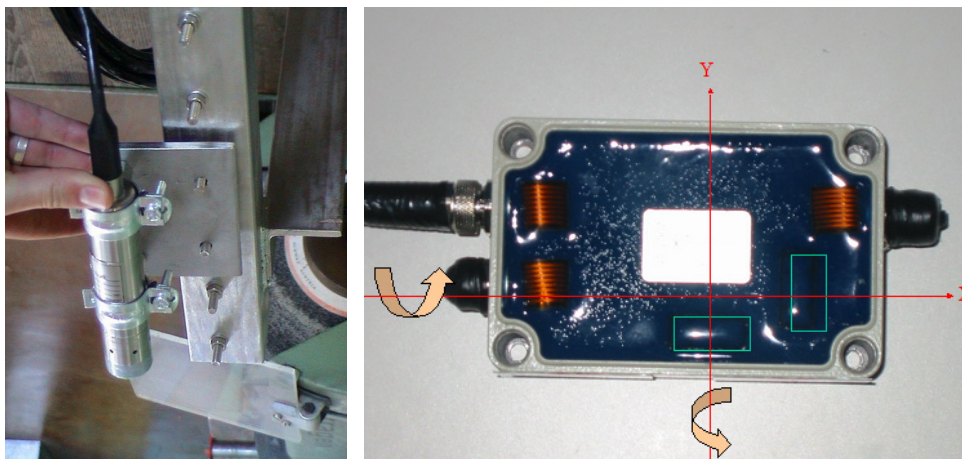


Abbildung 6.4a-b: Drucksensor zur Messung der Bojen-Eintauchtiefe (links) und kapazitiver, zweiachsiger Neigungsmesser (rechts) zur Bestimmung der Lagekomponenten des Antennenmastes.

dergenehmigung erwirkt wurde. Diese Funkmodems verwenden das gesamte Frequenzspektrum zwischen dem Up- und dem Downlink-Fenster des GSM-Mobilfunks (902 bis 918 MHz). Neben der Spreizung des Signals werden die Datenpakete redundant auf verschiedenen Kanälen übertragen, so dass bereits intern durch die Geräte eine Fehlerkorrektur durchgeführt werden kann. Bojenseitig arbeiten die Funksysteme mit einer Sendeleistung von 1 W. Im Rahmen aufwändiger Tests stellte sich für diese konkrete Anwendung eine Datenübertragungsrate von 38.400 Baud als optimaler Wert heraus.

6.1.3.1.3 Sensor-Technik

Alle verwendeten Sensoren werden mit einer Datenrate von 1 Hz ausgelesen. Die Synchronisation der Daten erfolgt mit Hilfe der bekannten Übertragungsgeschwindigkeit der einzelnen seriellen Ports. Trotz der Tatsache, dass es sich um eine asynchrone Datenübertragung handelt, kann so eine Synchronisationsgenauigkeit von etwas besser als 2/100 s erreicht werden, die für diese Anwendung ausreichend ist.

Bei den auf den Forschungsbojen verwendeten GPS-Empfängern handelt es sich um 2-Frequenz-Geräte des Herstellers NovAtel der seinerzeit neuesten Generation (OEM4-Plattform). Die eingesetzten GPS-600-Antennen dieser Firma sind deutlich kleiner und leichter als herkömmliche Choke-Ring-Antennen, sollen laut Hersteller-Angaben aber auch über ein entsprechend geformtes Antennenmuster die Wirkung des Mehrwege-Effektes reduzieren. Ein zusätzliches Ortungs-System überträgt die Position an einen Inmarsat-Satelliten und ermöglicht so die Verfolgung der Bojen auch für den Fall, dass sie sich von ihrer Verankerung lösen und den terrestrischen Funkbereich von ca. 30 km verlassen sollten.

Der kapazitive Neigungsmesser 2D-NSE-MC der Firma GEMAC arbeitet verschleißfrei und liefert vollwertige Lageinformationen (zweiachsige Neigungsmessung), die zur Reduktion der GPS-Antennen-Höhe auf den Meeresspiegel benötigt werden. Die Genauigkeit der Winkelmessungen kann bei ruhiger See mit etwa 0,5 bis 1 Grad angesetzt werden, was eine Unsicherheit in der Höhenreduktion von 1 bis 2 cm verursacht.

Schließlich dient der Drucksensor GW-420 von Sensotec noch zur Ermittlung der Eintauchtiefe der Boje. Er bildet somit das noch fehlende Verbindungsstück zu einer vollständigen Reduktion der GPS-Höhen auf den Meeresspiegel. Der verwendete Sensor hat gemäß Herstellerangaben eine Genauigkeit von 0,1% bei einem Druckbereich bis 1 psi, was ungefähr einer Eintauchtiefe von 70 cm entspricht.

6.1.3.2 Referenzstation

Als Standort für die benötigte Referenzstation fiel die Wahl auf das Gelände einer Kläranlage nordwestlich der Stadt Ciutadella an, da die Distanz zu den Bojen hier nur 8 bis 9 km beträgt und die



Abbildungen 6.5a-c: Gelände der Referenzstation in der Nähe der Stadt Ciutadella mit den installierten GPS-Antennen auf der linken und einem Teil der telemetrischen Einrichtung auf der rechten Seite.

Anlage über eine stabile Energieversorgung verfügt. Weiterhin befindet sich die Anlage auf einem Felsplateau in unmittelbarer Nähe der Küste, was zu einer hervorragenden Stabilität der Datenfunkstrecke führt. Abbildungen 6.5a-c illustrieren einige Komponenten der Station.

Datenaufzeichnung und Kommunikationsaufgaben nehmen voneinander getrennte PC-Systeme wahr, die durch unterbrechungsfreie Stromversorgungen vor kurzzeitigen Stromausfällen geschützt sind. Die GPS-Messungen werden dabei IGS-konform alle 30 s aufgenommen, während eines Überfluges in Übereinstimmung mit den Bojensystemen mit 1 Hz (jeweils 30 min vor dem Überflug beginnend und 30 min danach endend). Der Kommunikations-Server (Betriebssystem: Windows 2000) ist für den Empfang der Bojendaten verantwortlich, stellt aber auch über GSM-Mobilfunk Fernwartungsmöglichkeiten zur Verfügung, so dass auf die Referenzstation jederzeit von außerhalb zugegriffen werden kann.

Als GPS-Referenzempfänger kommen zwei NovAtel OEM3-Empfänger zum Einsatz, die ebenfalls auf zwei Frequenzen GPS-Signale empfangen können, zusätzlich aber noch auf den Empfang von WAAS bzw. EGNOS-Signalen ausgelegt sind. Die Messungen der meteorologischen Sensorstation vom Typ Vaisala PTU200 werden im Minutentakt aufgezeichnet. Der Drucksensor ist redundant ausgelegt und weist eine Genauigkeit von ca. 0,2 hPa bei hoher Langzeitstabilität auf.

Bezüglich der Kommunikation mit den Bojen kommen ebenfalls die bereits erwähnten Funkmodems zum Einsatz. Die Signale werden allerdings bilateral im Sende- und Empfangsbetrieb auf 5 W verstärkt und liegen damit deutlich über den zum erfolgreichen Datentransfer unter schlechten Wetterverhältnissen definierten Erfordernissen, hatten doch Testläufe am Ammersee in Deutschland bei leichtem Regenfall gezeigt, dass bereits eine Leistung von nur 0,1 W für die Datenübertragung im 900-MHz-Band bei einer Distanz von 9 km und guten Sichtverhältnissen grundsätzlich ausreicht. Zusätzlich zu den auch auf den Bojen verwendeten Rundstrahl-Antennen mit einer Verstärkung von 6 dB kann die Referenzstation auf eine Richtantenne mit einer Verstärkung von 13 dB umgeschaltet werden.

Die Kommunikation zwischen der Referenzstation und der Universität der Bundeswehr München wird durch den Umstand erschwert, dass die Kläranlage nicht über eine Anbindung an das Telefonnetz verfügt. Aus diesem Grunde erfolgt die Fernwartung mit Hilfe eines GSM-Mobilfunk-Modems. Mangels GPRS- oder vergleichbarer Dienste ist die Datenübertragung auf 9.600 Baud beschränkt. Eine Richtantenne hilft bei der Herstellung einer stabilen Funkverbindung zur nächstgelegenen Basisstation in Cala en Blanes.

6.1.3.3 Technische Verbesserungsmöglichkeiten

Die verwendeten Neigungsmesser, die auf Grund der vorhandenen Exzentrizitäten zwischen Meeresspiegel und GPS-Antenne (mehr als 2 m) für eine genaue Reduktion der Antennenhöhe auf die

Oberfläche von zentraler Bedeutung sind, können als ein Schwachpunkt des Systems betrachtet werden. Zwar wurden kapazitive Neigungsmesser, die verschleißfrei arbeiten, bereits in vorhergehenden Missionen eingesetzt, doch sind sie anfällig gegenüber dynamischen Einflüssen, denn die durch Wellen auftretenden Störbeschleunigungen wirken sich auf die Messwerte aus. Alternativen bestünden im Einsatz von Kreiselssystemen. Gegenwärtig wird weiterhin untersucht, ob ein System mit zwei statt wie bisher einer GPS-Antenne Verbesserung verspricht, das auch die Lagebestimmung der Boje zulassen würde. Eine Veränderung des geplanten Neigungssystems war indes nicht mehr möglich, da zwischen der Definition des Systemdesigns und seiner Realisierung nur knapp ein Monat lag, alternative Verfahren der Neigungsreduktion aber deutliche Änderungen am eingebetteten Computersystem und der Software erfordert hätten.

In Zusammenhang mit der Höhenreduktion darf auch über Alternativen zur Eintauchtiefenmessung nachgedacht werden. Zwar weist der verwendete Drucksensor eine sehr hohe Genauigkeit auf, doch ist sein Messbereich auf 70 cm beschränkt - eine Höhe, die im Einzelfall von den Vertikalbewegungen der Bojen übertroffen werden kann. Diese Tatsache kann zu Verfälschungen bei der Tiefenberechnung führen. Auch beschreiben die verwendeten hydrostatischen Formeln beim Vorhandensein turbulenter Strömungen im Bereich des Sensors ohnehin nicht mehr oder nur noch eingeschränkt die Realität. Alternativen bestünden in Magnetfeldsensoren⁶, weiterhin bietet die Infrarot- und Ultraschall-Technik die Möglichkeit, die Distanz zwischen Wasseroberfläche und Sensoraufhängung zu messen.

6.2 Datenverarbeitung und Ergebnisse

Die hier durchzuführende kinematische GPS-Positionierung stellt ein typisches Szenario dar, das keine Möglichkeit zur Ableitung von Flächenkorrekturparametern oder zur Anwendung anderer, ähnlicher Ansätze bietet, da eine flächenhafte Verteilung von Referenzstationen nicht vorhanden und auf Grund der Land-See-Geometrie auch zumeist aus geografischen Gründen nicht realisierbar ist. In diesem Sinne kommt den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methoden ein gesteigertes Interesse zu. Neben der Auswertung über kurze Basislinien folgt die Betrachtung großräumiger kinematischer Netze, welche die in Kapitel 5 untersuchten Entfernungen nochmals deutlich übersteigen. Die Referenzlösung bzgl. der kinematischen Bojenpositionen wurde mit dem kommerziellen Programmpaket GeoGenius erstellt, dessen Entwicklung an der Universität der Bundeswehr unter dem Namen Topas begann⁷.

Neben der kinematischen Datenanalyse mussten die Koordinaten der errichteten Referenzstations-Antennen durch statische Positionierung bestimmt und über die Laufzeit des Projektes kontinuierlich beobachtet werden, um präzise und auf das ITRF referenzierte Höhen als Endergebnisse bereitstellen zu können. Diese Aufgabe wurde mit der im Zeitraum von 1998 bis 2000 entwickelten und aus dem Analysesystem TropAC hervorgegangenen Software GTCE durch Anwendung einer Kalman-Filterung gelöst⁸.

6.2.1 Höhenbestimmung für die Referenzstation

Die gewonnenen mittleren Stationskoordinaten basieren im Wesentlichen auf der Anbindung an die relativ nahe gelegene EUREF-Permanentstation auf Mallorca (MALL) sowie weitere Stationen an der spanischen Küste. Die für dieses Projekt entscheidenden ellipsoidischen Höhen der beiden auf der Referenzstation verwendeten GPS-Antennen betragen, bezogen auf die Referenzepoche 2002,55 im ITRF2000, für den ersten Empfänger (CIU1) 81,303 m und für das zweite System (CIU2) 81,309 m. Die Standardabweichung der Höhenkomponente kann mit 2 mm abgeschätzt werden. Bei einer Quasi-Geoidhöhe⁹ von rund 49,3 m ergibt sich somit eine Normalhöhe von knapp 30 m.

⁶ Prinzip „MagneRule“, siehe z.B. <http://www.polaron-group.co.uk/components/magnerule.htm> (September 2004).

⁷ siehe auch LANDAU [1998]

⁸ weitere Details finden sich in SCHÜLER [2001]

⁹ benutzt wurde das Quasigeoid-Modell nach DENKER und TORGE [1998]

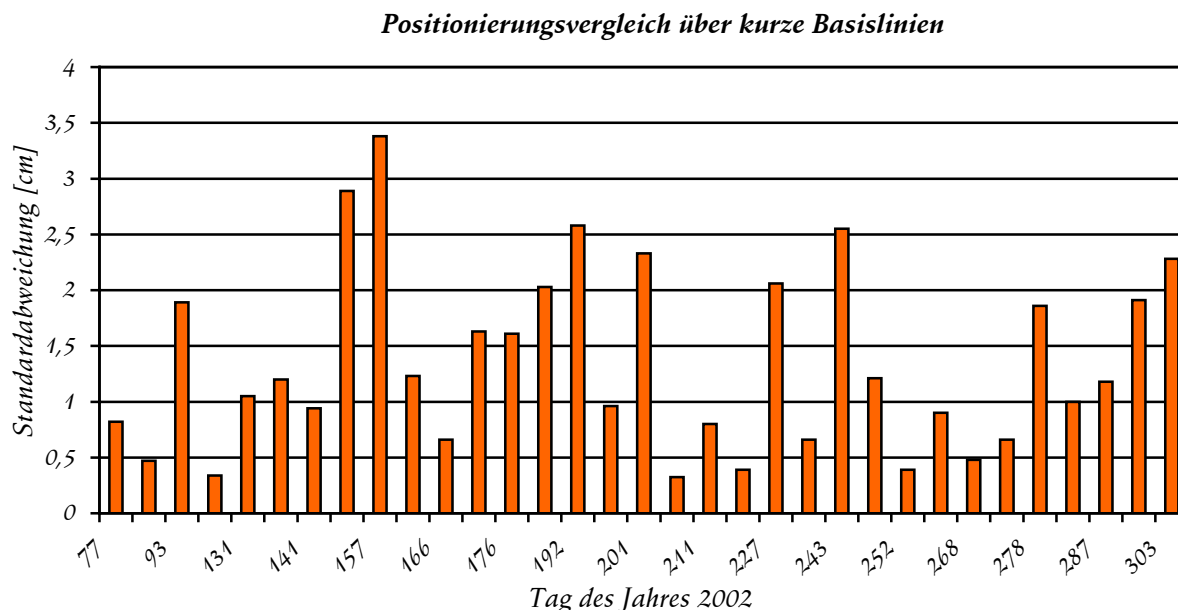


Abbildung 6.6: Vergleich der ermittelten kinematischen Positionslösungen (Standardabweichung s_d) über die kurzen Basislinien zu den Stationen CIU1 und CIU2 mit der entsprechenden Referenzlösung von GeoGenius.

6.2.2 Bojenpositionierung

Die über kurze und lange Basislinien gewonnenen GPS-Antennenhöhen werden nachfolgend mit den Ergebnissen des kommerziellen Paketes GeoGenius verglichen. Dessen Referenzlösung stützt sich grundsätzlich auf die kurzen, 8 bis 9 km langen Basislinien und kann daher als von hoher Genauigkeit betrachtet werden. Exemplarisch werden in diesem Abschnitt die Ergebnisse für Forschungsboje FTB2 dargestellt.

6.2.2.1 Kurze Basislinien (CIU1, CIU2)

Bei im automatischen Modus generierten Positionslösungen wurden vornehmlich die im Vergleich zur L_2 -Frequenz präziseren L_1 -Daten genutzt, wenngleich zusätzlich die L_2 -Trägerphasen zur Erkennung von Phasensprüngen einbezogen wurden. Eine Glättung der Trajektorien erfolgte nicht. Daten beider Referenzstations-Empfänger CIU1 und CIU2 fanden in einer geschlossenen Ausgleichung Verwendung.

An den Tagen 147, 157 sowie 208 lieferte die eigene L_1 -basierte Positionslösung keine ausreichend hohe Genauigkeit für eine erfolgreiche Mehrdeutigkeitsfixierung und musste durch die Wide-Lane-Lösung (virtuelle Wellenlänge von 86 cm an Stelle von nur 19 cm auf L_1) ersetzt werden. Für die Tage 208 und 281 waren manuelle Eingriffe nötig, da die automatisch generierte Lösung nicht von zufriedenstellender Qualität war (L_1 -Lösung erfolgreich, aber Verdichtung der genutzten Datenrate notwendig).

Abbildung 6.6 veranschaulicht die Höhengenaugkeit. Dargestellt wird die aus den Höhendifferenzen zwischen GeoGenius und TropAC berechnete Standardabweichung in einem Zeitfenster von insgesamt 60 Sekunden um den Zeitpunkt des Satellitenüberfluges. Bei 8 Überflügen (24%) liegt die Standardabweichung bei über 2 cm, überschreitet aber die Marke von 3,5 cm nicht. In 15 von 33 Fällen - was gut 45% der Experimente ausmacht - liegt die Übereinstimmung bei 1 cm oder besser. Insgesamt kann somit festgestellt werden, dass ein hohes Maß an Übereinstimmung zwischen den beiden Lösungen besteht. In 91% der Experimente war eine erfolgreiche Lösung unter alleiniger Verwendung der Einzelfrequenzdaten möglich.

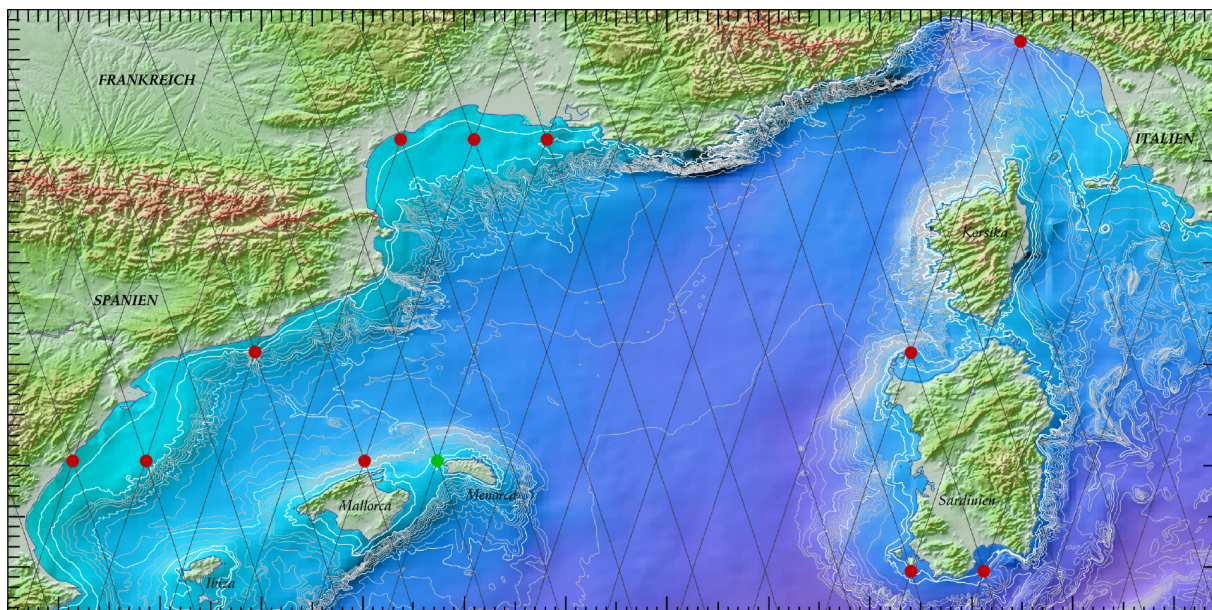


Abbildung 6.7: Genutzte Bojenposition bei Menorca (grün) und zusätzliche nutzbare Kreuzungspunkte (rot) im westlichen Mittelmeer bei Anwendung der Langbasislinien-Prozessierung ohne Installation zusätzlicher Referenzstationen. Die Entfernung von der Küste wird lediglich durch die maximal mögliche Verankerungstiefe der Bojen bedingt, die in diesem Zusammenhang auf ca. 200 m veranschlagt wurde.

6.2.2.2 Lange Basislinien

Die Notwendigkeit der Installation einer in möglichst geringer Entfernung zu den Bojen gelegenen Referenzstation führt zu erhöhten Kosten. Könnten vorhandene Referenzstationen, z. B. aus dem IGS- oder EUREF-Netzwerk - trotz größerer Entfernung - erfolgreich zur Bojenpositionierung genutzt werden, so würde sich eine deutliche finanzielle Entlastung ergeben. Gleichzeitig (oder alternativ) könnten die Bojen in größerer Küstenentfernung bisher nicht genutzte Hochseebereiche erschließen. Ein Blick auf Abbildung 6.7 verdeutlicht, dass allein in dem für diese Kalibrierkampagne vorgesehenen Gebiet des westlichen Mittelmeeres neben dem tatsächlich genutzten Kreuzungspunkt mindestens 7 weitere Positionen besetzt werden könnten¹⁰, was zu einem deutlichen Datenzuwachs an Kalibrier-Informationen führen würde - ein entscheidender Punkt in Anbetracht der vergleichsweise geringen Zahl an ENVISAT-Überflügen innerhalb der Intensivmessphase.

In Abbildung 6.8 wird das zur Positionierung verwendete Netzwerk dargestellt, wobei zwei unabhängige Analysen durchgeführt wurden, nämlich die bereits 2002/2003 durchgeführten Berechnungen über die sehr langen Basislinien zu den Stationen MADR und MATE sowie über das französische Subnetz mit den Stationen TLSE, GRAS und AJAC. Letzteres Subnetz wurde erst im Jahre 2004 analysiert, wobei eine Interpolation der Referenzstations-Daten von 30 s auf 1 s notwendig war.

In beiden Fällen übersteigen die Längen der Basislinien bereits den im vorgehenden Kapitel gezogenen Grenzbereich von »langen Basislinien«, der dort mit ungefähr 200 bis maximal 400 km festgelegt worden war. Bereits die kürzeste Basislinie (nach TLSE) beträgt 430 km, die längste (nach MATE) sogar 1100 km. Eine erfolgreiche Fixierung der Mehrdeutigkeiten kann auf Grund verbleibender Restfehler bei diesen Experimenten keineswegs mehr garantiert werden. Nachfolgende Abschnitte sollen einen Eindruck des gegenwärtig auswertetechnisch Machbaren vermitteln und gleichzeitig aufzeigen, welches Genauigkeitspotenzial eine Fließkomma-Lösung (keine Fixierung) aufweist.

¹⁰ Diese Orte umfassen nur Meeresgebiete mit einer Tiefe, die nicht deutlich über 200 m liegt, so dass eine feste Verankerung der Bojen mit den beschriebenen Textilsilen möglich wäre.

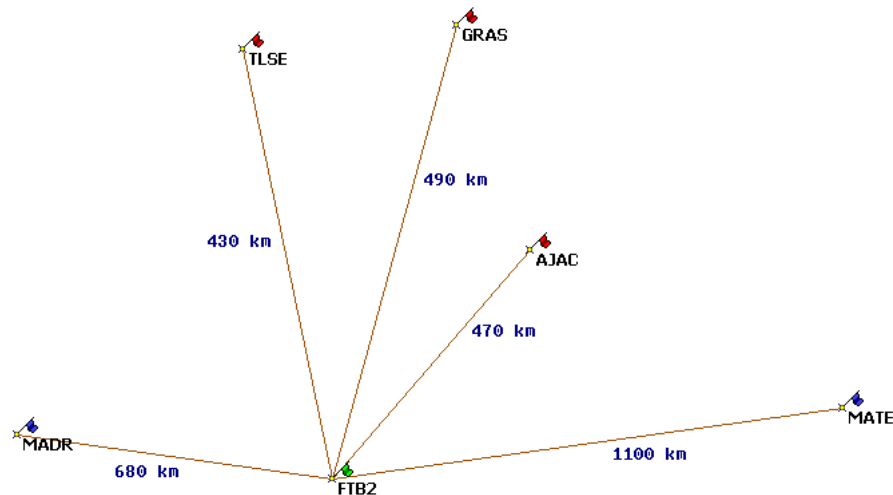


Abbildung 6.8: Netzbild der für die Experimente über lange Basislinien benutzten Stationen. Die Stationen MADR und MATE entstammen dem IGS LEO Netzwerk und erlaubten die Nutzung originärer 1 Hz-Daten, während für die französischen IGS Stationen TLSE, GRAS und AJAC die 1/30 Hz-Daten interpoliert werden mussten. Die Positionsbestimmung über diese Stationen erfolgte in einem separaten Analyse-Lauf.

6.2.2.2.1 Verwendung der Referenzstationen MADR und MATE

Für die im Rahmen dieser Untersuchungen ausgewählten Experimente über lange Basislinien wurden zunächst die IGS Referenzstationen Madrid (MADR, Spanien, 680 km entfernt) und Matera (MATE, Italien, 1300 km entfernt) genutzt, die als Bestandteil des IGS LEO-Netzwerks GPS-Daten mit einer geeigneten zeitlichen Auflösung von 1 Hz bereitstellen. Die troposphärischen Korrekturen für die Referenzstationen entstammen kombinierten IGS- oder EUREF-Produkten. Für die Bojen kommt das GDAS-Wettermodell unter Nutzung der TROPX-Datenrepräsentation zum Einsatz¹¹. Die ionosphärischen Fehler werden über eine Code-Carrier-Kombination ermittelt und verbleibende Restfehler durch Verwendung der Linearkombinationen $L_{4;3}$ bzw. $L_{5;4}$ entsprechend reduziert, wobei bereits deutlich wurde, dass diese virtuellen Beobachtungen eine vergleichsweise geringe Wellenlänge von 10 bis 11 cm besitzen, was die Mehrdeutigkeitsfixierung etwas erschwert.

Die in Tabelle 6.1 zusammengetragenen Ergebnisse für 8 willkürlich ausgewählte Tage zeigen, dass zwei Experimente mit Standardabweichungen von 1,1 bzw. 1,5 cm gute Ergebnisse aufweisen. Am Tag 182 liegt dieser Wert mit knapp 5 cm in einem noch akzeptablen Bereich, während es am Tag 87 zur Fehlfixierung vereinzelter Mehrdeutigkeiten kommt und mit einer Genauigkeit von 9 cm bereits die Genauigkeitsforderungen überschritten werden. An 4 Tagen kann keine erfolgreiche Fixierung vorgenommen werden, so dass mit den als Fließkomma-Zahlen bestimmten Mehrdeutigkeiten positioniert werden muss, was zu einer für diesen Zweck ungenügenden Standardabweichung von rund 20 cm führt.

Tag des Jahres	Linear-Kombination	Mehrdeutigkeits-Fixierung	Standardabweichung s_e
87	$L_{4;3}$	ja	9,1 cm
122	$L_{4;3}$	ja	1,5 cm
147	$L_{5;4}$	nein	20,7 cm
157	$L_{5;4}$	nein	20,0 cm
182	$L_{5;4}$	ja	5,0 cm
192	$L_{4;3}$	ja	1,1 cm
217	$L_{5;4}$	nein	18,9 cm
227	$L_{5;4}$	nein	25,2 cm

Tabelle 6.1: Ergebnisse der kinematischen Bojenpositionierung über die weit entfernten Referenzstationen Madrid (MADR) und Matera (MATE) in einem symmetrischen Zeitfenster von 60 Sekunden um den Zeitpunkt des Satelliten-Überflugs über den Kreuzungspunkt.

¹¹ siehe SCHÜLER [2000] bzw. SCHÜLER [2001, S. 209ff]

6.2.2.2 Verwendung der Referenzstationen TLSE, GRAS, AJAC

Die französischen IGS-Stationen TLSE, GRAS und AJAC befinden sich nicht weiter als 500 km von der Bojenverankerung entfernt. Die GPS-Messungen dieser Stationen liegen lediglich in 30 s Intervallen vor, können aber auf die benötigte Frequenz von 1 Hz interpoliert werden. Für 13 Überflüge wurde die kinematische Höhenbestimmung durchgeführt. Grundsätzlich sei erwähnt, dass sich die nachfolgend gemachten Aussagen zur Streuung bzw. Genauigkeit im Gegensatz zum vorhergehenden Abschnitt auf das gesamte Messintervall von knapp 60 Minuten beziehen und nicht lediglich auf ein 60 Sekunden Zeitfenster um den unmittelbaren ENVISAT-Überflug, so dass die Ergebnisse nicht unmittelbar mit jenen zuvor dargestellten vergleichbar sind.

In Tabelle 6.2 werden die mit verschiedenen Konfigurationen bzw. virtuellen Signalen gewonnenen Ergebnisse zusammengefasst. Unter Berücksichtigung der hohen Genauigkeitsforderungen für die Kalibrierung des ENVISAT Radar-Altimeters - der Sensor kann die Orbithöhe auf einige Zentimeter genau messen - kann die Güte der Ergebnisse folgendermaßen klassifiziert werden: Standardabweichungen s_Δ von etwa 3,5 cm oder besser¹² können als voll zufriedenstellend und für den beabsichtigten Zweck als brauchbar bezeichnet werden. Werte zwischen 3,5 und 6,0 cm sind noch eingeschränkt nutzbar und ungenauere Ergebnisse für die Radaraltimeter-Kalibrierung kaum noch

Tag	Kombination	Ionosphäre	Fixierung	Systematik Δ	Std. Abw. s_v	Std. Abw. s_e
87	$L_{77,60}$	---	nein	-6,4 cm	5,3 cm	8,3 cm
122	$L_{5,4}$	IONEX	ja	-2,0 cm	3,6 cm	4,1 cm
	$L_{77,60}$	---	nein	-0,1 cm	2,7 cm	2,7 cm
141	$L_{4,3}$	IONEX	ja	2,5 cm	5,3 cm	5,9 cm
	$L_{9,7}$	CMC	ja	2,4 cm	5,0 cm	5,5 cm
	$L_{77,60}$	---	nein	-4,8 cm	4,1 cm	6,3 cm
166	$L_{9,7}$	CMC	nein	-4,8 cm	1,8 cm	5,1 cm
	$L_{9,7}$	IONEX	partiell (94%)	-11,0 cm	2,5 cm	11,3 cm
	$L_{77,60}$	---	nein	-4,6 cm	1,8 cm	5,0 cm
192	$L_{77,60}$	---	nein	-22,0 cm	2,9 cm	22,2 cm
198	$L_{77,60}$	---	nein	-0,6 cm	2,3 cm	3,4 cm
208	$L_{9,7}$	IONEX	ja	-12,2 cm	7,6 cm	14,5 cm
	$L_{77,60}$	---	nein	-15,4 cm	5,3 cm	16,3 cm
217	$L_{5,4}$	IONEX	ja	-2,4 cm	2,4 cm	3,4 cm
	$L_{9,7}$	CMC	ja	3,0 cm	3,8 cm	4,8 cm
	$L_{9,7}$	IONEX	ja	2,1 cm	3,5 cm	4,1 cm
	$L_{77,60}$	---	nein	-2,4 cm	2,1 cm	3,2 cm
236	$L_{9,7}$	CMC	partiell (18%)	-3,8 cm	5,2 cm	6,4 cm
	$L_{9,7}$	IONEX	ja	-0,7 cm	6,3 cm	6,4 cm
	$L_{77,60}$	---	nein	0,5 cm	4,7 cm	4,8 cm
252	$L_{77,60}$	---	nein	1,5 cm	2,7 cm	3,1 cm
262	$L_{9,7}$	IONEX	ja	1,3 cm	2,9 cm	2,9 cm
	$L_{77,60}$	---	nein	10,5 cm	3,3 cm	11,0 cm
268	$L_{5,4}$	IONEX	ja	-0,3 cm	2,4 cm	2,4 cm
	$L_{9,7}$	IONEX	partiell (95%)	1,1 cm	2,1 cm	2,4 cm
	$L_{77,60}$	---	nein	4,8 cm	2,2 cm	5,3 cm
271	$L_{9,7}$	CMC	nein	-13,5 cm	3,7 cm	14,0 cm
	$L_{9,7}$	IONEX	nein	-13,1 cm	3,8 cm	13,6 cm
	$L_{77,60}$	---	nein	-13,6 cm	3,7 cm	14,1 cm

Tabelle 6.2: Übersicht bzgl. der kinematischen Höhenbestimmung der Forschungsboje FTB2 über die Referenzstationen TLSE, AJAC und GRAS. Der Ergebnisse beziehen sich auf das gesamte Aufzeichnungsintervall von ca. 60 Minuten (Beginn jeweils etwa 30 Minuten vor dem Überflug des Satelliten ENVISAT über den Kreuzungspunkt); bei partieller Fixierung wurde der Anteil der fixierbaren Mehrdeutigkeiten angegeben.

¹² Standardabweichung bezieht sich auf eine Einzelmessung

Tag	Kombination	Ionosphäre	$n_o \leftrightarrow n_{\text{eff}}$	n_{eff}/n_o	$\rho(5; 60; 300 \text{ s})$	T
122	$L_{5,4}$	IONEX	3492 \leftrightarrow 10	0,3%	0,80; 0,67; 0,38	15 s; 7 s
	$L_{77,60}$	---	3492 \leftrightarrow 14	0,4%	0,72; 0,44; 0,27	15 s
166	$L_{9,7}$	CMC	3536 \leftrightarrow 24	0,7%	0,62; 0,42; 0,03	63 s; 15 s
	$L_{77,60}$	---	3536 \leftrightarrow 24	0,7%	0,61; 0,41; 0,03	63 s; 15 s
217	$L_{5,4}$	IONEX	3497 \leftrightarrow 10	0,3%	0,84; 0,63; 0,52	keine
	$L_{77,60}$	---	3497 \leftrightarrow 10	0,3%	0,80; 0,53; 0,41	keine
252	$L_{77,60}$	---	3497 \leftrightarrow 22	0,6%	0,76; 0,47; -0,06	(83 s)
268	$L_{5,4}$	IONEX	3306 \leftrightarrow 30	0,9%	0,65; 0,27; 0,06	keine
	$L_{9,7}$	IONEX	3306 \leftrightarrow 50	1,5%	0,62; 0,18; 0,01	keine

Tabelle 6.3: Ergebnisse aus der Zeitreihenanalyse für ausgewählte Experimente (n_o : ursprüngliche Anzahl der Werte für die Zeitreihenanalyse; n_{eff} : effektive Messwertanzahl zur Charakterisierung der stochastisch unabhängigen Werte; ρ : Autokorrelationskoeffizient für den angegebenen Zeitpunkt; T: Periodendauer charakteristischer Schwingungen der Zeitreihe).

verwendbar. Bei dieser Klassifizierung muss jedoch bedacht werden, dass mögliche systematische Effekte die Verwendbarkeit weiter einschränken. Aus diesem Grund wurde die mittlere systematische Abweichung Δ zwischen der ermittelten und der Referenzlösung angegeben, da sie diesbezüglich eine Beurteilung der Ergebnisse erlaubt.

Ein Blick auf die Ergebnistabelle zeigt, dass an 6 der 13 Tage (46%) mindestens eine Lösung (Konfiguration) einen Wert für s_Δ von besser als 3,5 cm aufweist. An 3 Tagen (23%) liegen die Lösungen im Mittelfeld von 3,5 bis 6,0 m und während der restlichen 4 Tage (31%) ist die erreichte Genauigkeit schlechter. Die systematischen Abweichungen zwischen der ermittelten und der Referenzlösung überschreiten in der Mehrheit der Fälle 3,0 cm nicht. Auch wenn diese Bilanz auf den ersten Blick recht positiv erscheint, ergeben sich bei einer detaillierteren Betrachtung folgende Feststellungen:

Nur in wenigen Fällen war eine Fixierung der Mehrdeutigkeiten erfolgreich bzw. hat die Fixierung zu einer wirksamen Verbesserung der Lösungen im Vergleich der über Fließkomma-Mehrdeutigkeiten erhaltenen Höhen geführt. Ein geeignetes Beispiel ist der ENVISAT-Überflug am Tag 262 des Jahres 2002. Hier konnte mit der ionosphärenfreien Linearkombination nur eine verhältnismäßig schlechte Lösung mit einem hohen systematischen Fehleranteil von mehr als 10 cm erzielt werden, während die fixierte Lösung mit Linearkombination $L_{9,7}$ auf eine Standardabweichung von weniger als 3 cm führte. Auch am Tag 268 kann eine ähnliche Feststellung getroffen werden, auch wenn der Unterschied zwischen Fließkomma- und fixierter Lösung nicht mehr so drastisch ausfällt.

In der Mehrheit der anderen Fälle weisen die Ergebnisse über Algorithmen, die mit Mehrdeutigkeits-Fixierung arbeiten, grundsätzlich keine höhere Qualität auf als die ohne Fixierung arbeitenden, die nur eine Fließkomma-Schätzung der Mehrdeutigkeiten vornehmen. An 4 Überflügen (31%) fallen die Fließkomma-Lösungen sogar in die höchste Genauigkeitskategorie mit $s_\Delta \leq 3,5 \text{ cm}$, in 3 Fällen (23%) in das Mittelfeld von $3,5 \text{ cm} < s_\Delta \leq 6,0 \text{ cm}$ und in 6 Experimenten (46%) schneiden die Ergebnisse schlechter ab, wobei die Lösung für Tag 141 mit 6,3 cm nur unwesentlich über der gezogenen Mittelfeld-Grenze von 6,0 cm liegt und das Ergebnis für Tag 87 mit 8,3 cm noch deutlich unter 1 dm bleibt. Nur in einem einzigen Fall (Tag 192) ergibt sich eine Abweichung von der Referenzlösung, die 2 dm knapp überschreitet. Diese Resultate können nicht nur als sehr erfreulich bewertet werden, zeigen sie doch, dass eine nicht fixierte Trägerphasenlösung bei kinematischen GPS-Anwendungen häufig auch mit einer Genauigkeit im Sub-Dezimeterbereich möglich ist. Als wesentlicher Grund für das hohe Genauigkeitsniveau dieses Analyselaufs darf die im Vergleich zu gängiger Kinematik-Software unterschiedliche Algorithmik angeführt werden: Auf eine sequentielle Filterung der Daten wird verzichtet. Statt dessen werden die GPS-Beobachtungen über möglichst lange Satelliten-Bahnbögen komplett »en bloc« in die Ausgleichung übernommen. Diese Methode führt zu einer größtmöglichen »geometrischen Strenge« der Lösung und führt deshalb häufig zu vergleichsweise guten Ergebnissen. Ein möglichst geringes Zeitintervall der aufeinanderfolgenden Phasenmessungen ist dabei von untergeordnetem Interesse - hier wurde eine zeitliche Auflösung von lediglich 15 Sekunden verwendet - und ist lediglich zur Vorverarbeitung der Daten sinnvoll und teilweise auch notwendig. Eine

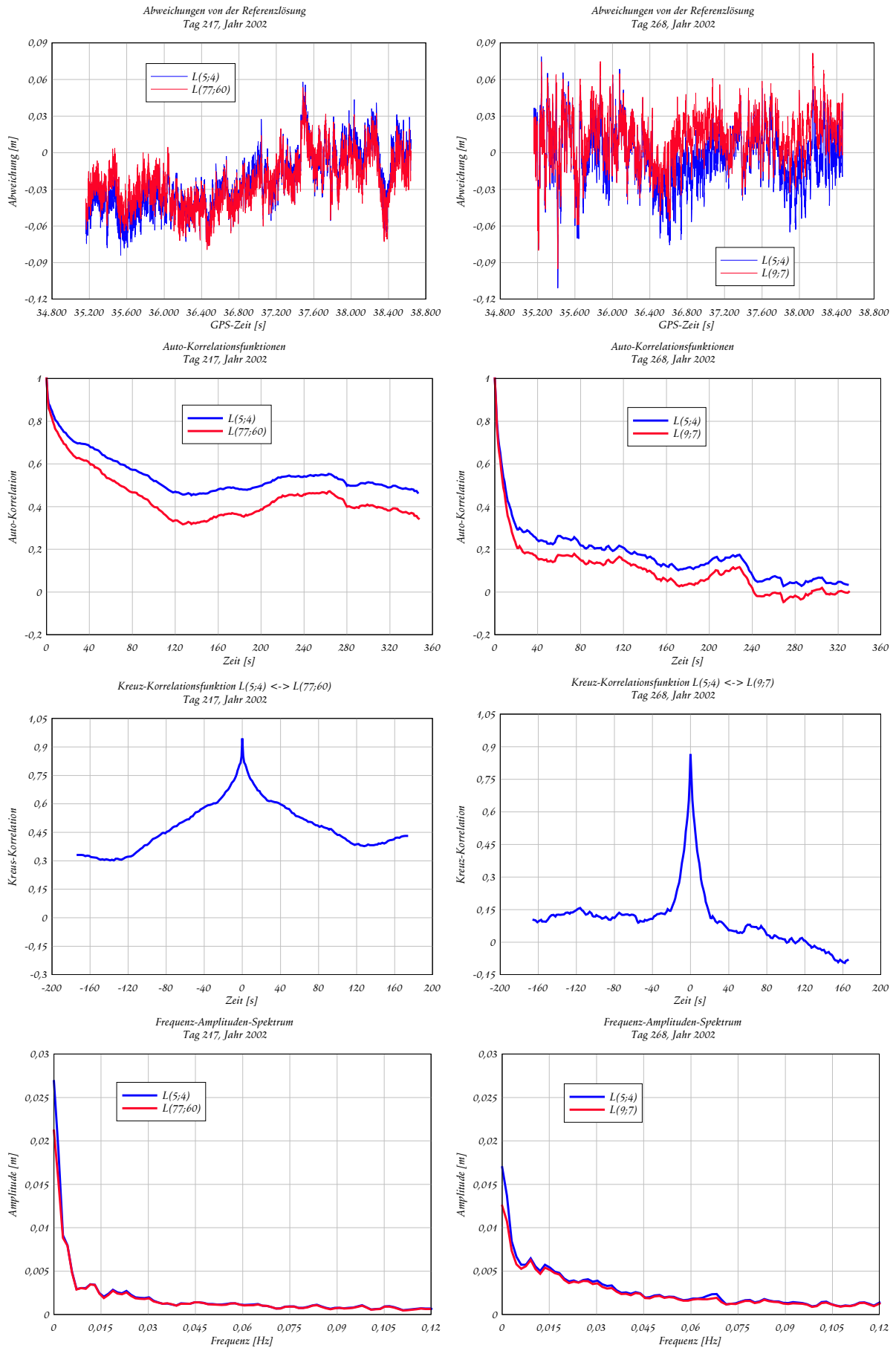


Abbildung 6.9a-h: Zeitreihenanalyse für die Abweichungen von der Referenzlösungen an den Tagen 217 und 268 (jeweils Signal, Auto-Korrelations-Funktionen, Kreuz-Korrelationsfunktion und Fourier-Spektrum).

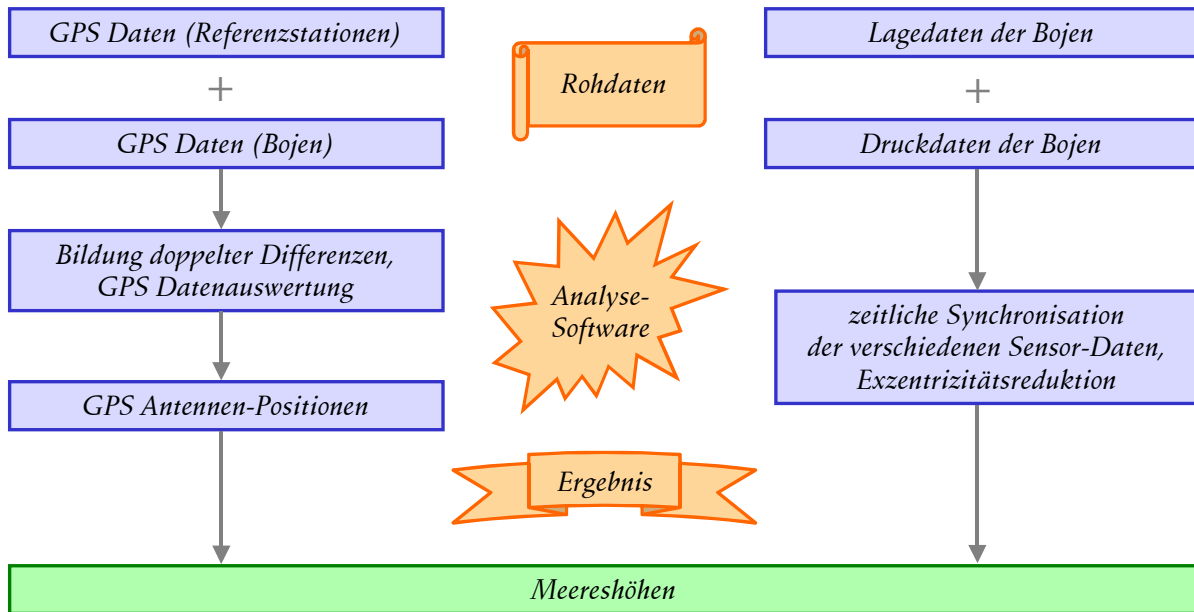


Abbildung 6.10: Verarbeitungskette der verschiedenen Sensor-Daten zur Ableitung der Meereshöhen; die GPS-bezogenen Analyseschritte sind auf der linken, die zusätzlich benötigten Sensoren auf der rechten Seite dargestellt.

möglichst lange, unterbrechungsfreie Beobachtung der Satelliten ist hingegen von entscheidender Bedeutung, da auf diese Weise eine bestmögliche Präzision bei der Bestimmung der Mehrdeutigkeiten (als Fließkommawerte) gewährleistet werden kann.

Die Zeitreihenanalyse erlaubt weitere Einblicke in die Beschaffenheit der erhaltenen ellipsoidischen Höhen der Forschungsboje. In Tabelle 6.3 werden die gewonnenen Kenndaten exemplarisch für eine Auswahl der Experimente dargestellt. Dabei fällt zunächst auf, dass die effektive Messwertanzahl n_{Eff} , welche die Zahl der voneinander stochastisch vollkommen unabhängigen Werte charakterisiert, erheblich unter der Anzahl der originären Höhenwerte n_0 liegt. Dieses Missverhältnis deutet auf das Vorhandensein signifikanter Auto-Korrelationen hin. Tatsächlich liegt die Auto-Korrelation ρ auch nach 60 s zumeist noch in der Nähe von 0,5 und in einigen Fällen selbst nach 300 s noch in diesem Bereich. Diese deutlichen zeitlichen Korrelationen der Höhenabweichungen zur Referenzlösung können eine Reihe von Ursachen haben: Zunächst können systematische Restfehler in der Referenzlösung nicht ausgeschlossen werden, die entsprechende systematische Signaturen in der Zeitreihe der Differenzen hinterlassen würde und zu signifikanter Auto-Korrelation führen würde. In erster Linie dürften aber systematische Fehler in den Langbasislinien-Lösungen zu zeitlichen Trends führen, die sich in erhöhter Auto-Korrelation bei der Zeitreihenanalyse äußern. Dies trifft insbesondere auf Unsicherheiten auf Grund der atmosphärischen Refraktion oder etwaiger ionosphärischer Restfehler zu.

Bei einigen Zeitreihen treten weiterhin schwach ausgeprägte Periodizitäten auf, die in den Experimenten der Tage 122 sowie 166 erkennbar sind. Typische Periodendauern liegen bei 60 und 15 s mit Amplituden zwischen 3 und 7 mm. Wird berücksichtigt, dass die Originaldaten der benutzten Referenzstationen mit einem Zeitintervall von 30 s vorlagen, so können diese Schwingungen mit der Dateninterpolation in Verbindung gebracht werden, deren maximale Fehler mit den maximalen zeitlichen Abständen von den gegebenen Messepochen korreliert sein dürften.

In Abbildung 6.9a-h werden die Zeitreihen, Auto- und Kreuz-Korrelationen sowie das Fourier-Spektrum für jeweils zwei Lösungen der Tage 217 und 268 gezeigt. Deutlich erkennbar ist die wesentlich höhere Auto-Korrelation bei den Lösungen für Tag 217. Diese resultieren aus den zuvor im Zusammenhang mit niedrigen effektiven Messwertanzahlen erwähnten, vorhandenen - aber nicht kompensierten - Trends, die zu einem regelrechten Offset in der Auto-Korrelationsfunktion führen. Konkret bedeutet dies, dass der im Fall von Tag 268 gut erkennbare Gauß-Markov-Prozess am Tag 217 auch für große Zeitabstände nicht klar gegen null konvergiert, sondern sich auf einem recht

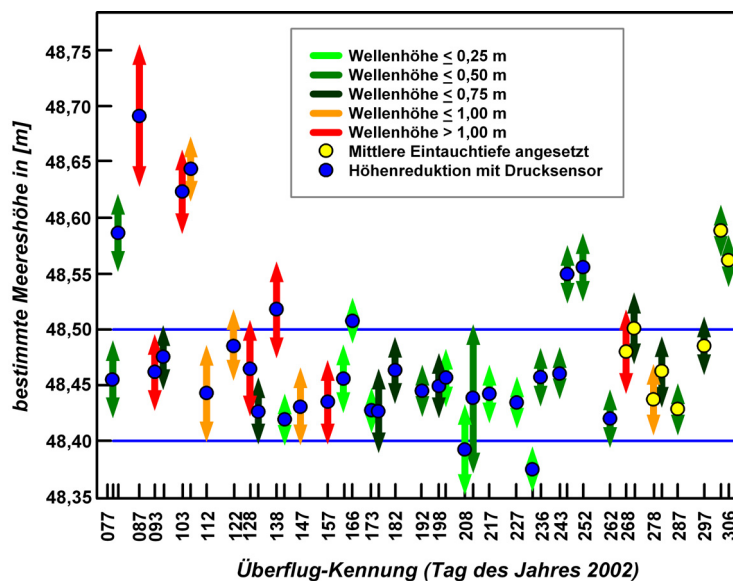


Abbildung 6.11: Gegenüberstellung der einzelnen Meereshöhenbestimmungen für Forschungsboje FTB2. Die Pfeillängen zeigen die über Fehlerfortpflanzung ermittelten Standardabweichungen an. Die Höhen wurden um den Einfluss von Gezeiten und Änderungen des Luftdrucks bereinigt.

hohen Niveau stabilisiert. Würde zusätzlich zur Mittelwertabsplattung der vorhandene lineare Trend kompensiert werden, ergäbe sich ein ähnliches Bild wie an Tag 268. Die Kreuz-Korrelationsfunktion zwischen den beiden Lösungen des jeweiligen Tages deutet auf keine Phasenverschiebung der beiden Zeitreihen hin, da das Maximum stets zu Zeitoffset 0 erreicht wird. Für Tag 268 zeigt sich eine deutlich klarere Begrenzung dieses Extremwertes, während die Funktion für Tag 217 breiter einläuft.

6.2.2.2.3 Zusammenfassende Bewertung

Die über lange Basislinien gewonnenen kinematischen Ergebnisse sind für den Zweck der Kalibrierung von Radar-Altimetern auf Grund der hohen Genauigkeitsforderungen mit Einschränkungen nutzbar. Die Erfolgsrate liegt bei ungefähr 50%, d.h. in etwas der Hälfte der Experimente (Überflüge) konnten über das französische Subnetz Lösungen abgeleitet werden, die als nützlich einzustufen sind. Im Falle der sehr langen Basislinien (MADR und MATE) liegt diese Rate niedriger. Es bleibt zu erwähnen, dass häufig auch die Float-Lösung unter Nutzung des hier verwendeten Algorithmus eine vergleichsweise hohe Genauigkeit aufweist. Insgesamt zeigt sich jedoch die Überlegenheit der Positionsbestimmung über kurze Basislinien.

6.2.3 Reduktion der Höhen

Zwar steht in dieser Arbeit die GPS-basierte Positionsbestimmung im Vordergrund, doch soll nicht unerwähnt bleiben, dass die Bestimmung der GPS-Antennenposition allein für die Aufgaben der Radaraltimeter-Kalibrierung noch nicht ausreicht. Vielmehr soll aus dieser Antennenhöhe auf die momentane Höhe des Meeresspiegels geschlossen werden. Abbildung 6.10 fasst die einzelnen Verarbeitungsschritte zusammen: Im linken Bildteil wird die GPS-Datenverarbeitung dargestellt, die zu den bereits diskutierten ellipsoidischen Höhen der Forschungsbojen führt. Um aus diesen Resultaten nun die instantane Höhe des Meeresspiegels berechnen zu können, kommen Neigungssensor und Druckmesser (Bestimmung der Bojen-Eintauchtiefe) zum Einsatz (siehe rechter Bildteil), wobei neben den physikalischen und geometrischen Berechnungen zunächst noch die zeitliche Synchronisation auf die GPS-Messepochen durchzuführen ist. Tatsächlich führt diese Sensorintegration zu deutlichen Belastungen des Fehlerbudgets. Insbesondere die Reduktion auf Grund der Bojenneigung kann wegen der Unsicherheiten in den Messwerten der Inklinometer nur mit eingeschränkter Genauigkeit erfolgen. Weiterführende Erläuterungen zur Kalibrierung sowie fehlertheoretische Untersuchungen zum Neigungs- und Drucksensor finden sich in Köberle und Kramer [2002].

Weiterhin ergibt sich ein Übertragungsproblem: Während ENVISAT die Meereshöhe quasi als Flächenmittelwert über den effektiv genutzten Fußpunktdurchmesser bestimmt, repräsentieren die Bojenwerte letztlich Punktmessungen innerhalb dieses Fußpunktes. Um beide Werte miteinander vergleichbar zu machen, werden die Bojenmessungen durch zeitliche Mittelwertbildung zusammengefasst. Das Zeitfenster zur Mittelbildung wird dabei unter Annahme einer ähnlichen Wellenbewegung im gesamten Fußpunktbereich so gewählt, dass es jene Zeitspanne überstreicht, die eine Welle zur Durchquerung der Fußpunktfläche benötigen würde. Weitere Informationen zu diesen Aspekten finden sich insbesondere in FISCHER und SCHULZ [2002].

Abbildung 6.11 stellt die Meereshöhenbestimmungen gegenüber. Um eine bessere Vergleichbarkeit der Einzelwerte zu gewährleisten, wurden diese vom Gezeiten effekt sowie vom Einfluss der Luftdruck-Änderungen auf die Meereshöhe (»inverser Barometer-Effekt«) befreit. Gut 75% der Ergebnisse liegen innerhalb des blau eingezeichneten 5-cm-Bandes um die Höhe von 48,45 m (oder befinden sich nur marginal außerhalb). Drei deutliche Ausreißer sind innerhalb des ersten Viertels des Messzeitraumes zu sehen, die im Zusammenhang mit hohen Wellenhöhen stehen (rote/orange Pfeile). Die Fehlerfortpflanzung hat in diesen Fällen zu einer zu optimistischen Genauigkeitsabschätzung geführt, was teilweise auf die nur unvollständig bekannten Fehlerparameter des Neigungsmessers, insbesondere auf dynamische Terme, zurückzuführen ist. Der Median¹³ findet sich bei 48,456 m mit einem IQR¹⁴ von 5,1 cm. Unter Ausschluss der drei stärksten Ausreißer beträgt der arithmetische Mittelwert 48,466 m mit einer Standardabweichung von 5,0 cm - ein unter Berücksichtigung der verschiedenen Fehlerquellen zufriedenstellendes, aber im Hinblick auf zukünftige Kampagnen dieser Art durchaus noch steigerungsfähiges Resultat.

6.3 Wertung und Ausblick

Die im Rahmen dieses Projektes ausgeführten Arbeiten blieben nicht frei von Rückschlägen. Bedingt durch das unerwartet sehr stürmische Frühjahr des Jahres 2002 zeigte sich beispielsweise, dass die Bojen des Typs »Solarleuchttonne« nicht für diesen Einsatzzweck bzw. dieses Einsatzgebiet geeignet sind. Glücklicherweise erwiesen sich die »Großen Fasstonnen« als robuste Sensorplattformen, die zum Erfolg des Projektes entscheidend beitrugen.

Die verwendeten kapazitiven Neigungsmesser können als ein wesentlicher Schwachpunkt des Systems betrachtet werden, da sie anfällig gegenüber den durch Wellenbewegungen hervorgerufenen dynamischen Einflüssen sind. Diese Tatsache gab zur Befürchtung Anlass, dass auf Grund der überdurchschnittlich schlechten Wetterverhältnisse im Jahr 2002 vor Menorca mit einem deutlichen Genauigkeitsverlust zu rechnen wäre. Abbildung 6.11 zeigt diese Tendenzen glücklicherweise nicht in der erwarteten Deutlichkeit auf, was zu einem guten Teil mit der internen Tiefpassfilterung der Neigungsmesser begründet werden kann, die im Mittel auch bei rauerer See letztlich doch noch zu akzeptablen Werten führte. Alternativen bestünden im Einsatz von Kreiselssystemen. Gegenwärtig wird weiterhin untersucht, ob ein System mit zwei statt wie bisher einer GPS-Antenne Verbesserung verspricht, das auch die Lagebestimmung der Boje zulassen würde.

Trotz der in diesem Abschnitt geübten Kritik, die das bei größeren Bojen nicht unkritische Problem der Höhenreduktion adressieren, kann grundsätzlich festgestellt werden, dass sich das im Rahmen dieses Projektes realisierte Konzept bewährt hat. Gleichwohl ergibt sich für zukünftige Projekte dieser Art eine Notwendigkeit, die Genauigkeit der GPS-Bojen weiter zu steigern, da auch bzgl. der Messgenauigkeit der Satelliten-Altimeter eine Steigerungstendenz festgestellt werden kann.

¹³ Der *Median* entspricht dem mittigen Wert (50%-Grenze) der sortierten Werteliste. Er ist gegenüber Ausreißern weitgehend unempfindlich und wird daher dem Mittelwert vorgezogen.

¹⁴ Unter dem *Interquartile Range* (IQR) wird ein Maß für die Streuung verstanden, das sich aus der Differenz zwischen der 75%- und 25%-Grenze ergibt; siehe auch BOCK [2000].

7. Wasserdampfbestimmung auf bewegten Trägern

Mit Hilfe des GPS kann der integrierte Wasserdampfgehalt der Atmosphäre ermittelt werden. Anwendung hat diese eher untypische Methode inzwischen bei Feststationen gefunden - durchaus mit Erfolg, wie verschiedene Autoren belegen¹. Die Wasserdampfbestimmung im kinematischen Modus ist hingegen bisher auf Grund ihrer stärkeren Anforderungen an diese Auswertetechnik nur sehr unzureichend untersucht worden. Im Rahmen des BALTIMOS-Projektes sollte ein Klimamodell überprüft werden. In diesem Zusammenhang wurden die Möglichkeiten der Bestimmung des GPS-Wasserdampfes auf Schiffen in verschiedenen Experimenten genauer untersucht. Diese Methode könnte Datenlücken schließen, da über Meeresflächen gewöhnlich eher weniger terrestrische Messungen vorliegen als über Landflächen. Eine Zusammenfassung der gewonnenen Ergebnisse wird nachfolgend gegeben.

7.1 Kinematische und statische Wasserdampfbestimmung

Tatsächlich ist die kinematische Wasserdampfbestimmung mit GPS sehr viel komplizierter als bei der Nutzung statischer Referenzstationen. Der Hauptgrund hierfür ist primär in der Tatsache zu suchen, dass eine Feststation ihre Koordinaten praktisch nicht ändert bzw. die zeitabhängigen Effekte wie die Gezeiten der festen Erde sehr präzise modelliert werden können. Deshalb reduziert sich die Anzahl der Unbekannten in dem durchzuführenden Schätzprozess sehr stark, denn es müssen nur noch drei Koordinatenunbekannte berücksichtigt werden². Für die Troposphäre werden je nach Software und Konfiguration üblicherweise 12 bis 24 Zenitparameter bestimmt, die entsprechend zeitlich geglättete Laufzeitverzögerungen darstellen. SCHÜLER [2001] nutzt ein KALMAN-Filter, um die Troposphärenparameter zu schätzen und kann auf diese Weise eine kontinuierliche Zeitreihe der Laufzeitverzögerungen mit hoher zeitlicher Auflösung bereitstellen, die maximal der Datenrate für die GPS-Messungen entspricht³.

Die Lösung gestaltet sich im kinematischen Fall deutlich aufwändiger: Die Position eines Schiffes ändert sich zum Beispiel ständig, so dass sie Epoche für Epoche neu bestimmt werden muss. Diese zusätzlichen Ortsvektoren stellen eine Belastung bzgl. der Anzahl der Unbekannten und damit der Rechenzeit⁴, zusätzlich aber auch mit Bezug auf die Bedingungsichte (f/n) der Lösung dar, die nun schwächer bestimmt bleibt, so dass im Allgemeinfall mit einer geringeren Genauigkeit zu rechnen ist. Aus diesem Grunde wird im hier verwendeten Ansatz nur eine einzige - räumlich und zeitlich gemittelte - troposphärische Laufzeitverzögerung mitgeschätzt, so dass ein Ergebnis von ausreichender Genauigkeit für diese Anwendung erzielbar ist.

7.1.2 Troposphärische Laufzeitverzögerung

Die gesamte (oder neutrale) troposphärische Laufzeitverzögerung erreicht in Zenitrichtung ungefähr 2,5 m und wird - wie in Abschnitt 3.4.9.2 angeschnitten - auch von Komponenten in der Stratosphäre beeinflusst, die einen Beitrag zur hydrostatischen Verzögerung leisten. Auf Grund dieses großen Fehlerwertes muss der Effekt in der Satellitennavigation kompensiert werden. Wird dieser »Fehler« mitgeschätzt, so bietet er eine hochgradig nützliche Eingangsgröße für Anwendungen in der Meteorologie und Klimaforschung. Wird er nämlich entsprechend weiterverarbeitet, so lässt sich daraus der integrierte Wasserdampfgehalt der Atmosphäre ermitteln, der für die Energiebalance eine wichtige Rolle spielt und somit die Verbesserung von Niederschlagsprognosen erlaubt.

Zunächst wird während der GPS-Datenanalyse ein Näherungswert für die neutrale Laufzeitverzögerung berechnet. Dieser entstammt Modellen wie z. B. RTCA-MOPS, GTN oder TropGrid⁵ und

¹ siehe bspw. BEVIS u.a. [1992], GENDT u.a. [1999], SCHÜLER [2001]

² falls die Mitschätzung der Position überhaupt notwendig ist

³ bei IGS Stationen gegenwärtig 30 Sekunden

⁴ Beispiel: Für eine Zeitspanne von 1,5 Stunden fallen 540 Koordinatenparameter (also 180 Positionsvektoren) bei einem Datenintervall von 30 Sekunden an.

⁵ siehe Abschnitt 3.4.9.2.3

wird im Vergleich zur tatsächlichen Situation einen bestimmten Fehler aufweisen. Dieser Fehler, also die residuelle troposphärische Laufzeitverzögerung, wird während der Blockausgleichung mitgeschätzt und ergänzt den bisher vorliegenden Modellwert, was auf die - innerhalb der Messgenauigkeit des Systems - korrekte Laufzeitverzögerung führt.

Anschließend werden meteorologische Daten benötigt: Kenntnis des Luftdrucks erlaubt die präzise Berechnung der hydrostatischen Komponente unter Nutzung des Modells von SASTAMONIN⁶, so dass nach Subtraktion von der neutralen Laufzeitverzögerung noch die sog. »feuchte Komponente« verbleibt⁷. Diese Größe hängt unmittelbar mit dem integrierten Wasserdampfgehalt zusammen.

7.1.3 Konvertierung in den Wasserdampfgehalt

Zur Umwandlung der feuchten Laufzeitverzögerung in den integrierten Wasserdampfgehalt wird die zum partiellen Wasserdampfdruck e gewichtete Temperatur T_M

$$T_M = \frac{\int_{h_0}^{\infty} \frac{e}{T} \cdot Z_F^{-1} \cdot dh}{\int_{h_0}^{\infty} \frac{e}{T^2} \cdot Z_F^{-1} \cdot dh}, \quad (3.1)$$

auch »mittlere Temperatur« genannt, benötigt⁸. Z_F ist die Kompressibilität feuchter Luft und T die Temperatur entlang des Vertikalprofils. Die Umrechnung kann nur mit der Formel

$$q_{T_M} = 0,10200 + \frac{1708,08 [K]}{T_M} \quad \wedge \quad IWV = q_{T_M}^{-1} \cdot ZWD \quad (3.2)$$

erfolgen⁹. Die mittlere Temperatur kann aus Radiosondendaten berechnet oder aus Wettermodellen extrahiert werden. Können entsprechende Datenquellen nicht benutzt werden, so erlaubt der Ansatz nach SCHÜLER u.a. [2001c]

$$T_M = \bar{T}_M + \tilde{T}_M \cdot \cos \left[2\pi \cdot \frac{t_D - \Delta t_W}{365,25 [d]} \right] + q_T \cdot T_o \quad (3.3)$$

eine vergleichsweise genaue Ermittlung über die gemessene Oberflächentemperatur T_o , wobei zusätzlich klimatologische Größen (Mittelwert und saisonale Variation) einbezogen werden. Die Koeffizienten \bar{T}_M , \tilde{T}_M und q_T werden analog zum TropGrid-Modell auf einem $1^\circ \times 1^\circ$ Gitter gegeben.

7.1.4 Trägerplattformen

GPS-Messungen geodätischer Qualität wurden an Bord zweier Schiffe gesammelt. Zunächst wurde ein Zweifrequenz Empfänger vom Typ »Trimble 4400SSE« auf dem Forschungsschiff »Alkor« (siehe Abbildungen 7.1a-c) unter Betreuung von Kollegen des Instituts für Meteorologie (Universität Hamburg) verwendet. Die beiden Forschungsfahrten in der Ostsee haben besondere Bedeutung, da zusätzlich regelmäßige Radiosonden-Aufstiege mit hoher Genauigkeit und hoher zeitlicher Auflösung durchgeführt wurden. Auf diese Weise konnte der integrierte Wasserdampfgehalt unabhängig von den GPS-Messungen berechnet und die GPS-Methode somit auf Richtigkeit und Genauigkeit hin überprüft werden. Die »Alkor« wurde 1989 am IFM GEOMAR Forschungszentrum (Kiel) in den Dienst gestellt, hat eine Länge von 55 m und eine Breite von 12,5 m. Die Eintauchtiefe des Schiffes beträgt ungefähr 4,2 m. Die Brennstofftanks erlauben einen Aktionsradius von bis zu 7.500 km. Das

⁶ siehe Abschnitt 3.4.9.2.1

⁷ siehe Abschnitt 3.4.9.2.2

⁸ zu den Themen »mittlere Temperatur« und »Konvertierung« siehe MENDES u.a. [2000], SCHÜLER u.a. [2001c]

⁹ IWV = integrated water vapour (Wasserdampfgehalt); ZWD = zenith wet delay (feuchte Laufzeitverzögerung)



Abbildungen 7.1a-c: Ansichten des Forschungsschiffs »Alkor«. Das Foto auf der rechten Seite zeigt tatsächlich das Forschungsschiff »Heincke«, das mit der »Alkor« jedoch baugleich ist.



Abbildung 7.2: Ölauffangschiff »Bottsand«. Der GPS-Empfänger wurde dauerhaft für einen Zeitraum von etwa 2 Jahren am Signalmasten oberhalb der Brücke installiert, der auf der linken Schiffshälfte erkannt werden kann.

Dauerpersonal auf dem Schiff setzt sich aus nautischen und technischen Berufen mit 10 Mann Besatzung zusammen. Zusätzlich können bis zu 13 Wissenschaftler aufgenommen werden. Der eingesetzte GPS-Empfänger wurde temporär auf dem Brückendach befestigt.

Weiterhin wurde im Jahr 2001 ein baugleicher Zweifrequenz-Empfänger an Bord des Ölauffangschiffs »Bottsand« installiert. Die Besatzung zeichnete mit dem System zu bestimmten Terminen regelmäßig bis ins Jahr 2003 hinein Daten auf. Die »Bottsand« nimmt an Ölreinigungsaktionen im Ostseeraum teil. Sie kann bis zu 790 m³ verschmutzten Ölwassers speichern und die Schmutzstoffe vom Wasser mit einer Reinigungsrate von 140 m³ pro Stunde trennen. Wie in Abbildung 7.2 eindrucksvoll dargestellt, besteht das Schiff aus zwei Hälften, die im Prinzip nur durch ein Gelenk miteinander verbunden sind. Abgesehen von der Energieversorgung können die beiden Hälften autark voneinander arbeiten. Nach der Entdeckung eines Ölflecks öffnet sich das Boot in einem Winkel von maximal 65° und saugt das Schmutzwasser auf einer Breite von 42 m auf. Nach erfolgter Trennung wird das Wasser ins Meer zurückgeführt, während das Öl in den Speichertanks aufbewahrt wird. Der Betrieb der »Bottsand« wird von den Ostsee-Küstenländern finanziert. Der Betrieb erfolgt über die Bundesmarine mit einer zivilen Besatzung.

Die wesentliche Motivation zur Installation eines GPS-Empfängers auf diesem Schiff entspringt der Tatsache, dass die »Bottsand« auch regelmäßig die Gewässer vom Heimathafen in Warnemünde bis nach Kiel bzw. Rostock durchquert, so dass vergleichsweise viele Messungen des integrierten Wasserdampfgehalts in dieser Region der Ostsee gesammelt werden konnten. Die Messungen auf diesem Schiff hatten somit quasi-operationellen Charakter, während jene auf der »Alkor« primär zur Validierung dienten und sich auch nur auf zwei Messfahrten über einen Zeitraum von jeweils etwa einer Woche beschränkten.

7.2 Fahrten des Forschungsschiffs »Alkor«

Die Forschungsfahrten der »Alkor« fanden im Juni sowie Oktober/November 2001 statt. Auch wenn jede Fahrt nur ca. eine Woche dauerte, sei nochmals die Bedeutung dieser Messkampagnen für die Validierung der GPS-Methode mit Hilfe der qualitativ hochwertigen Radiosondendaten betont.

7.2.1 Fahrt im Juni 2001

Die erste Messfahrt der »Alkor« wurde während der Tage 165 bis 169 im Juni 2001 durchgeführt. Tabelle 7.1 zeigt die wichtigsten Ergebnisse, die während dieser Kampagne erzielt wurden. Diese Daten werden in Abbildung 7.3 und Abbildung 7.4 grafisch dargestellt. Generell können die Ergebnisse dieser ersten »Alkor«-Fahrt als recht erfolgreich bewertet werden.

Der über GPS ermittelte Wasserdampfgehalt (IWV) zeigt eine Abweichung von nicht mehr als ca. 3 kg/m^2 im Vergleich zu den Referenzdaten in etwa 50% der Experimente. In einigen Fällen ergeben sich Resultate, die als Ausreißer auffallen und in Abbildung 7.4 durch grüne Kreise markiert wurden. Abbildung 7.3 illustriert, dass die empirisch ermittelte Standardabweichung der GPS-Ergebnisse in einigen Fällen zu optimistisch ist, d. h. mit großer Wahrscheinlichkeit Fehlfixierungen in den Mehrdeutigkeiten vorliegen dürften. Ein solcher Fall ist das Experiment 168E (dessen Zahlenwert in jedem Fall außerhalb des Wertebereichs liegt) oder 169C (das Ergebnis liegt zumindest noch im zu erwartenden Bereich für den IWV). Werden die erkannten Ausreißer nicht in die in Abbildung 7.4

Experiment	Zeit UTC [h]	Dauer [h]	IWV_{GPS} [kg/m^2]	IWV_{NWM} [kg/m^2]	IWV_{RS} [kg/m^2]
165A	8,6	0,9	14,0	12,0	10,6
165B	11,6	1,3	15,4	10,1	11,9
165C	15,0	1,7	13,3	10,3	11,2
165D	18,1	1,2	13,2	11,8	13,7
165E	21,8	1,1	13,8	14,6	13,8
166A	10,2	0,7	22,2	12,5	11,1
166B	12,0	-	13,0	11,2	9,4
166C	15,2	-	0,9	11,4	9,9
166D	18,1	-	7,2	10,1	10,5
166E	21,5	2,1	11,9	11,0	10,5
167A	9,4	0,7	29,2	26,6	26,1
167B	11,8	-	30,2	29,1	27,7
167C	15,1	-	25,3	23,5	24,5
167D	17,9	-	21,0	18,4	21,1
167E	21,7	-	39,3	20,0	23,0
168A	7,1	1,2	19,2	20,2	17,0
168B	11,8	1,6	14,5	17,8	16,6
168C	14,0	0,6	14,1	18,1	16,6
168D	19,7	1,0	16,1	18,0	16,9
168E	23,5	1,1	43,6	19,7	17,3
169A	3,7	0,7	20,6	21,9	18,7
169B	7,3	0,6	21,9	24,4	24,6
169C	11,2	1,5	20,4	25,5	29,7
169D	16,3	1,6	31,5	26,8	31,1
169E	19,2	1,1	35,1	28,2	31,8

Tabelle 7.1: Ergebnisse der ersten Alkor-Fahrt im Juni 2001. Die Nummer des Experimentes steht auch für den Tag des Jahres 2001 (165 bis 169), an dem es durchgeführt wurde. Weiterhin werden die Zentralzeit (mittlere Zeit des Fensters) und das Glättungsintervall in Stunden angegeben. Die Position des Schiffes war während sämtlicher Messungen $\varphi = 56,0^\circ$ N und $\lambda = 18,7^\circ$ O. Auf der rechten Seite der Tabelle werden die GPS-Schätzungen des integrierten Wasserdampfgehalts (IWV) sowie jene des numerischen Wettermodells (NWM) und die der Radiosonden (RS) aufgelistet. Unbrauchbare Lösungen wurden in grauer Farbe markiert.

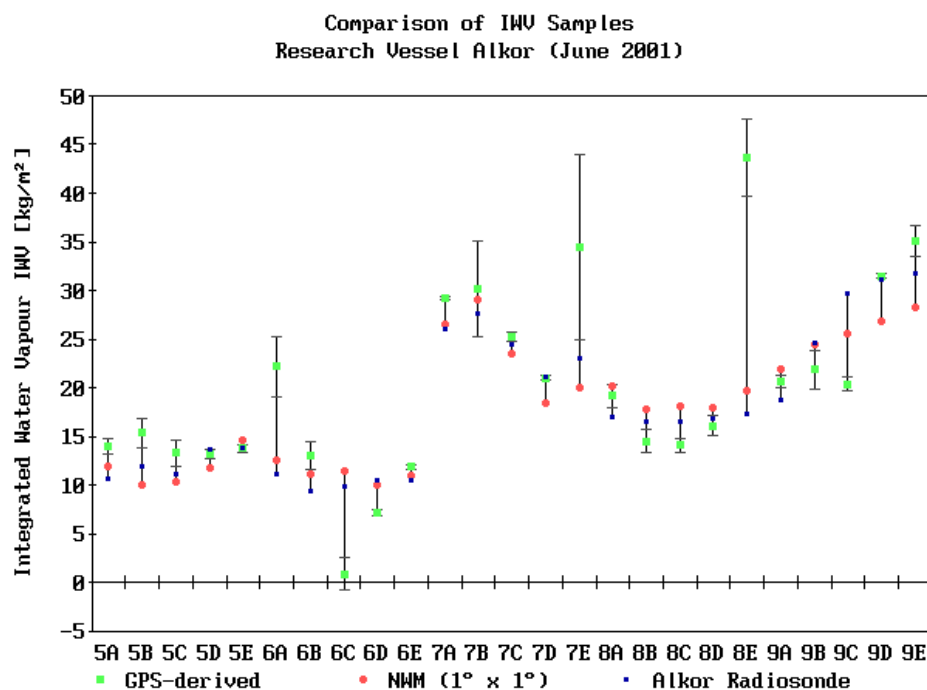


Abbildung 7.3: Vergleich der Wasserdampfbestimmungen aus den einzelnen Experimenten. Die GPS-Schätzungen (grün) werden den Werten des numerischen Wettermodells (rot) mit $1^\circ \times 1^\circ$ Auflösung sowie hochauflösenden Radiosonden-Aufstiegen (blau) gegenübergestellt, die von der Alkor im Juni 2001 gestartet wurden. Die empirische Standardabweichung (Präzision) der GPS-Schätzungen wurden in Form von Fehlerbalken eingezeichnet.

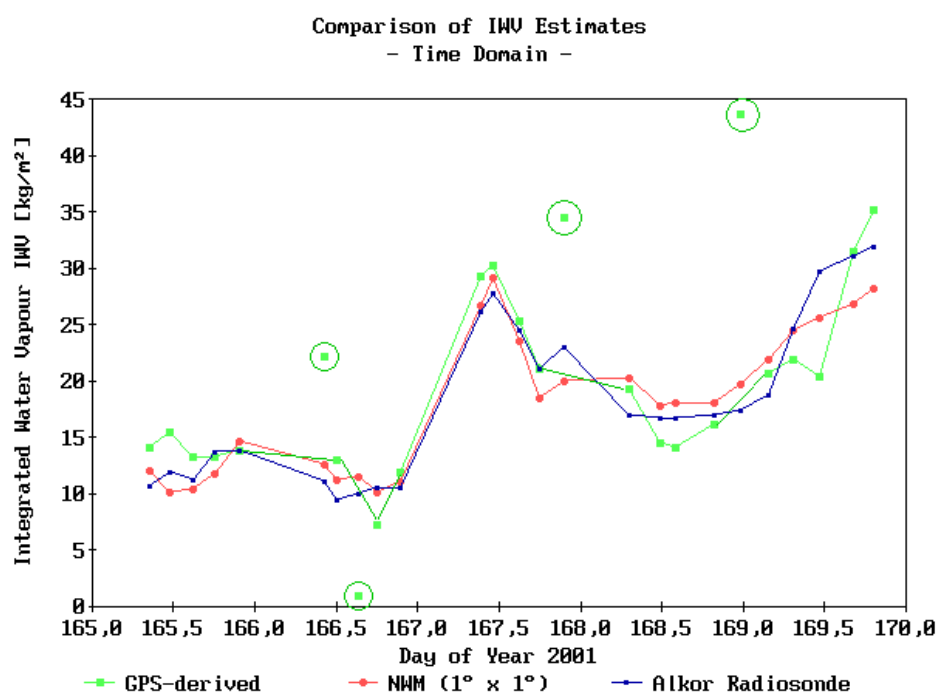


Abbildung 7.4: Vergleich der Schätzungen für den integrierten Wasserdampfgehalt im Juni 2001 (Zeitreihen von GPS (grün) mit jenen aus dem Wettermodell (rot) und den über Radiosondenaufstiegen abgeleiteten Daten (blau). GPS-Ergebnisse, die als unbrauchbar erkannt wurden, sind durch einen Kreis markiert worden und nicht in die Zeitreihe aufgenommen worden.

gezeigte Zeitreihe aufgenommen, so ergibt sich eine akzeptable Übereinstimmung mit den Referenzdaten, die aus dem numerischen Wettermodell¹⁰ sowie von den Radiosonden-Aufstiegen stammen. Es sei angemerkt, dass durch Verbesserungen in der stochastischen Modellierung der GPS-Fehlerschätzungen für die in Abschnitt 7.3 gezeigten Ergebnisse im Vergleich zu den »Alkor«-Resultaten etwas realistischere Genauigkeiten ermittelt werden konnten.

7.2.2 Fahrt im Oktober/November 2001

Eine zweite Messkampagne wurde in den Tagen 304 bis 309 des Jahres 2001 am gleichen Messpunkt in der Ostsee wie zuvor durchgeführt. Die Netzwerkconfiguration für die Auswertung entsprach dabei weitgehend jener für die vorhergehenden Versuche: Mehrere in der Umgebung befindliche IGS Stationen wurden genutzt, wobei die kürzeste Basislinie nach RIGA (170 km) und LAMA (270 km) reichte. Weitere berücksichtigte Referenzstationen waren im Wesentlichen wahlweise ONSA (Onsala, 440 km) und POTS (Potsdam, 540 km).

Die Datenauswertung stellte sich jedoch als deutlich problematischer im Vergleich zu den Experimenten im Juni heraus. Dieses Mal herrschte raue See, so dass häufig Radiosonden nicht zum Aufstieg kamen und die erfolgten Aufstiege häufig nicht mit den GPS-Messungen korrespondierten. Als weiteres Problem stellte sich der Verlust der zum Vergleich zuvor benutzten Wettermodelle auf Grund eines Festplattenfehlers heraus, so dass nur eine reduzierte Anzahl von Experimenten wirklich ausgewertet werden konnte.

Allgemein lässt sich feststellen, dass die erzielten Resultate in ihrer Übereinstimmung mit den Referenzwerten geringfügig schlechter ausfallen als bei den Experimenten im Juni 2001, was mit der höheren Schiffsdynamik begründet werden kann, ggf. aber auch mit mangelnder Repräsentativität der Radiosondendaten, die auf Grund der Windverhältnisse schneller abdrifteten als im Juni. Eine vergleichsweise gute Übereinstimmung wurde aber mindestens in einem Experiment pro Tag erzielt. Jenes am Tag 304, das 4. Experiment am Tag 307, das zweite am Tag 308 und das letzte in Abbildung 7.4 gezeigte Resultat weichen deutlich von den Radiosondendaten ab. Das erste Experiment am Tag

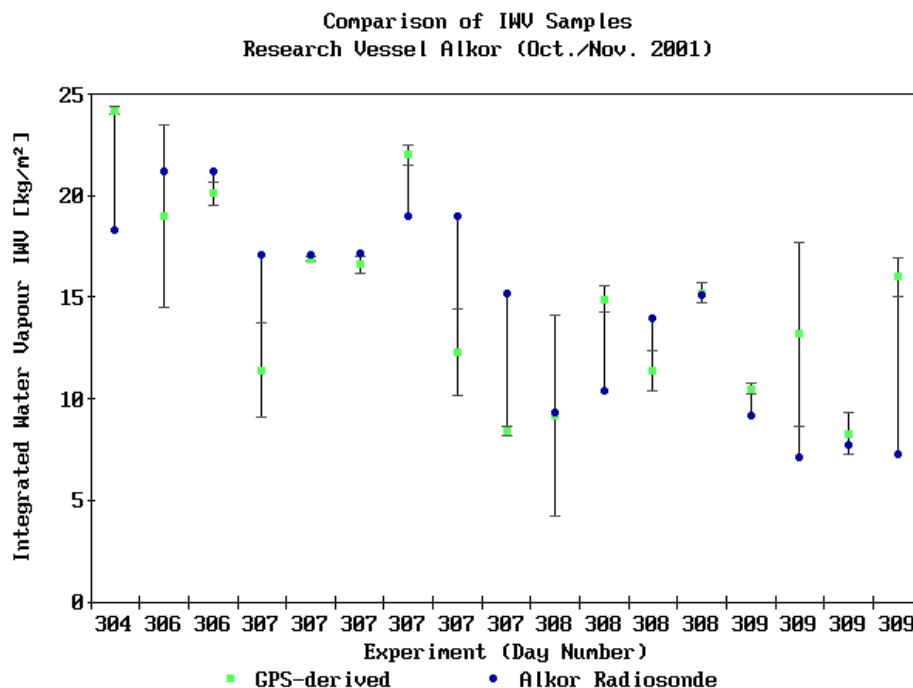


Abbildung 7.1: Vergleich der GPS-Wasserdampfschätzungen (grün) auf der »Alkor« im Oktober/November 2001 mit den Ergebnissen der Radiosonden-Aufstiege (blau). Die Fehlerbalken repräsentieren wiederum die empirischen Standardabweichungen der GPS-Resultate.

¹⁰ verwendetes Modell: NOAA NCEP GDAS FNL 1° × 1° mit zeitlicher Auflösung von 3 Stunden

308 liegt zufällig sehr nahe am Referenzwert, weist aber eine sehr hohe empirische Standardabweichung auf.

7.3 Fahrten des Ölauffangschiffs »Bottsand«

Ähnlich zum Forschungsschiff »Alkor« wurde auch auf der »Bottsand« ein Trimble 4400 SSE Empfänger installiert, allerdings erst zum Jahresende 2001. Die »Bottsand« durchkreuzt die Ostsee zwischen Rostock/Warnemünde und Lübeck/Kiel regelmäßig und wurde deshalb als Trägerplattform für diese quasi-operationelle Messphase ausgewählt, um Daten in Regionen zu sammeln, die sich üblicherweise durch Datenarmut auszeichnen.

7.3.1 Fahrten im Jahr 2001

Nur wenige experimentelle GPS-Aufzeichnungen wurden im Jahre 2001 unternommen, da der Empfänger erst zum Ende des Jahres endgültig an Bord installiert werden konnte. Am 10. Dezember 2001 wurden erste brauchbare Ergebnisse erzielt.

7.3.2 Fahrten im Jahr 2002

Die Datenausbeute für das Jahr 2002 kann als sehr zufriedenstellend bezeichnet werden. Auch hier zeigte sich wie bereits bei Auswertung der »Alkor«-Daten gelernt, dass ungefähr in der Hälfte der durchgeführten Experimente brauchbare Ergebnisse erzielt werden konnten, wobei das Adjektiv »brauchbar« dahingehend verstanden werden soll, dass die Übereinstimmung mit den Vergleichswerten aus dem numerischen Wettermodell mindestens $3,9 \text{ kg/m}^3$ oder besser sein musste. Insgesamt 104 Experimente brachten in diesem Sinne gute Resultate. Auszugsweise werden 4 davon auf den nächsten Seiten inkl. Ergebnistabelle dargestellt.

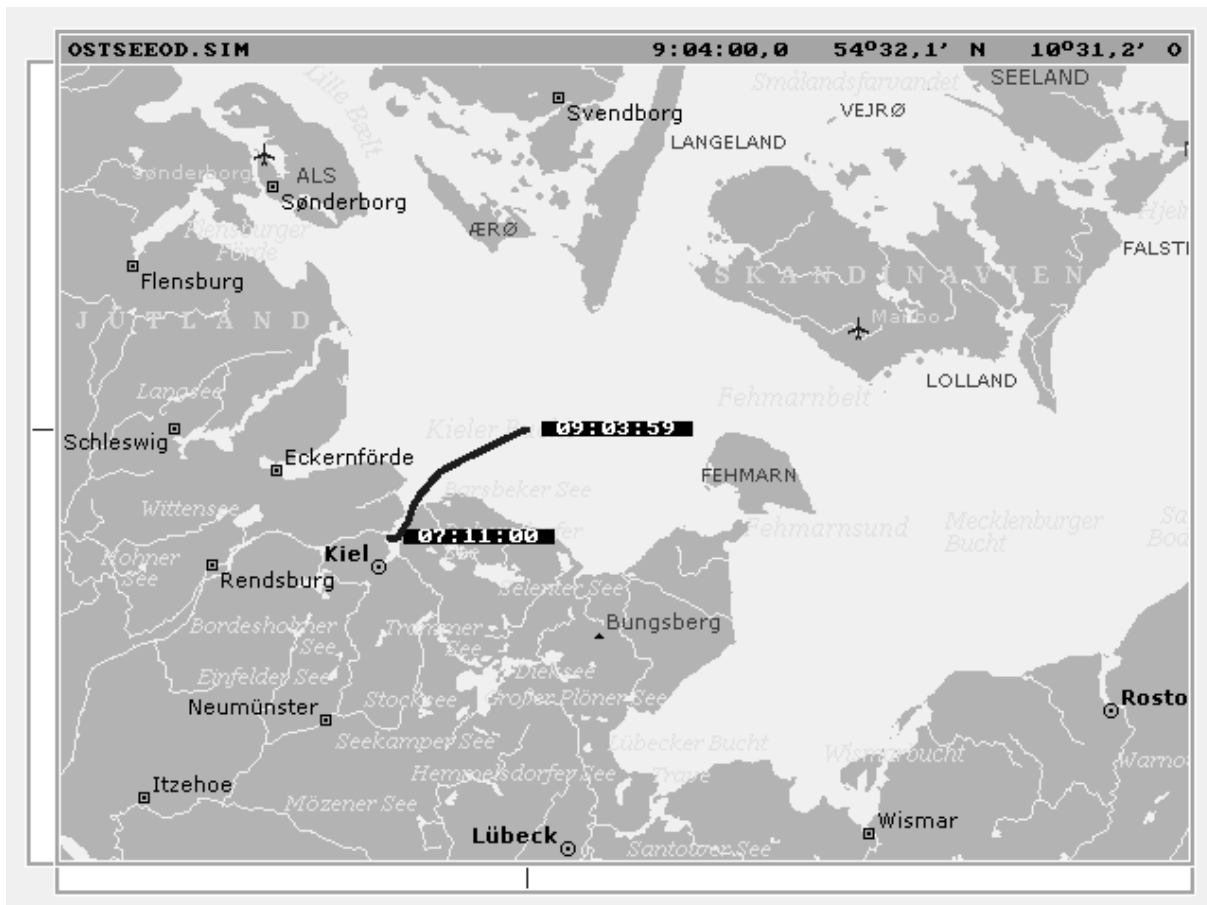
Die nachfolgenden Karten stellen die Fahrtspur der »Bottsand« über den jeweiligen Auswertezeitraum des Experimentes dar. Diese Spur charakterisiert damit auch das räumliche und auch zeitliche Intervall für die Glättung der geschätzten troposphärischen Laufzeitverzögerung. Detaillierte Ergebnisse des Experimentes werden in der abgedruckten Tabelle gegeben. In den meisten Karten finden sich noch Einträge für den Start des Experiments (GPS-Zeit: Stunden, Minuten und Sekunden). Das Ende des Auswertintervalls wurde entweder ebenfalls eingezeichnet, oder es findet sich in der Fensterüberschrift der Karte wieder, die auch die letzte Position des Schiffes enthält.

Die Ergebnistabelle gibt Informationen über das Datum und die Zeit des Experiments. Die »Zentralzeit« ist der mittlere Zeitpunkt im Auswertintervall. Letzteres wird als »Zeitdauer« explizit angegeben. Die »Distanz« wird angegeben, um den Leser über das zur Anwendung kommende räumliche Glättungsintervall zu informieren. Weiterhin werden die mittlere Position des Schiffes (geografische Breite und Länge) sowie die mittlere Höhe des Sensors angegeben. Die folgende Daten-sektion gibt Aufschluss über die Eingangsgrößen, die zur Zerlegung der totalen Laufzeitverzögerung in die hydrostatische und die feuchte Komponente sowie zur Konvertierung der feuchten Laufzeitverzögerung in den Wasserdampfgehalt benötigt werden.

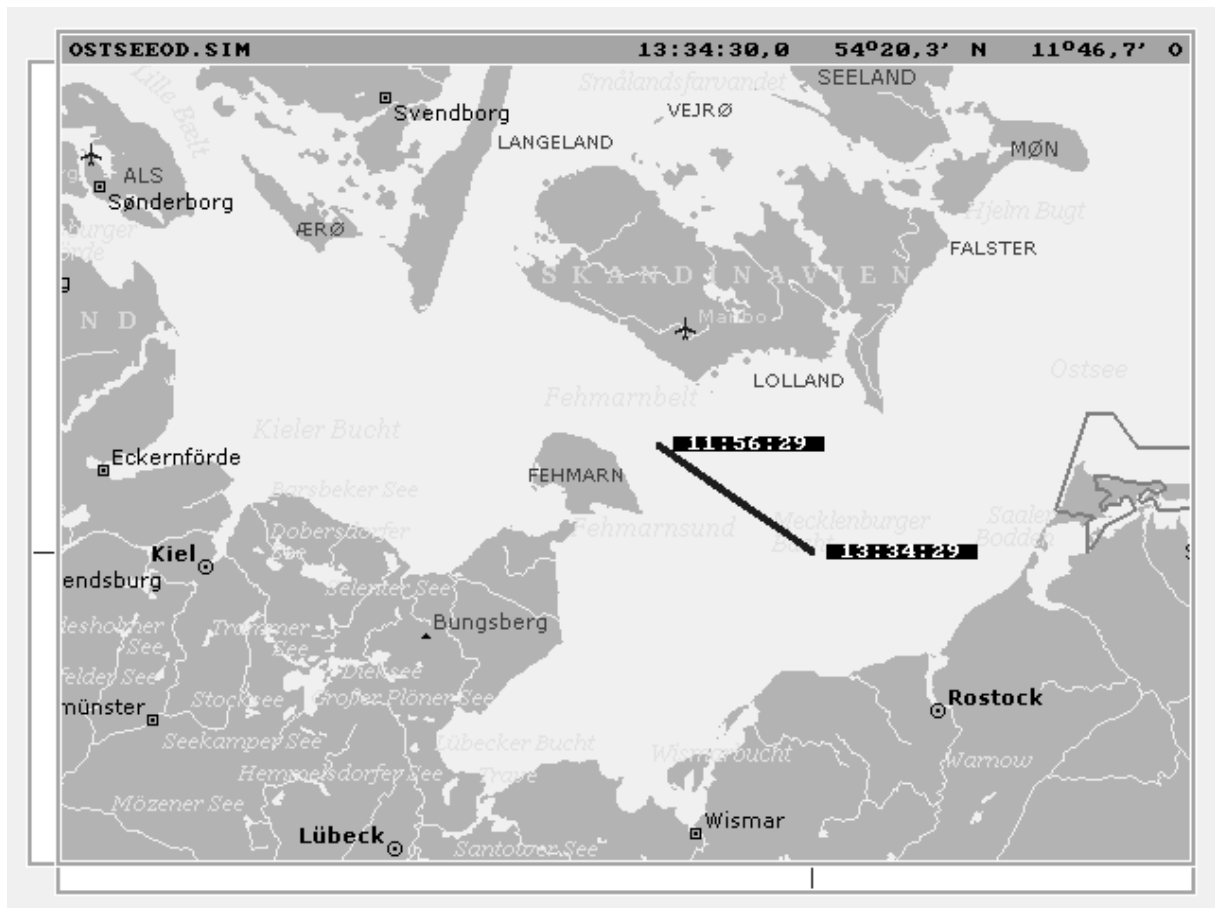
Nachfolgend werden die verschiedenen Troposphärenfehler aufgeführt, also die neutrale (gesamte) Laufzeitverzögerung, die der GPS-Datenausgleichung entstammt und zum Vergleich die im numerischen Wettermodell integrierte. Die hydrostatische Komponente wird mit Kenntnis des Luftdrucks errechnet. Schließlich wird die feuchte Komponente angegeben. Im letzten Abschnitt der Tabelle folgen dann der Wasserdampfwert mit einem Genauigkeitsmaß, das den Wettermodellwert als Referenz annimmt, sowie die empirische Standardabweichung des GPS-basierten Ergebnisses.

7.3.2.1 Änderungen im Jahr 2002

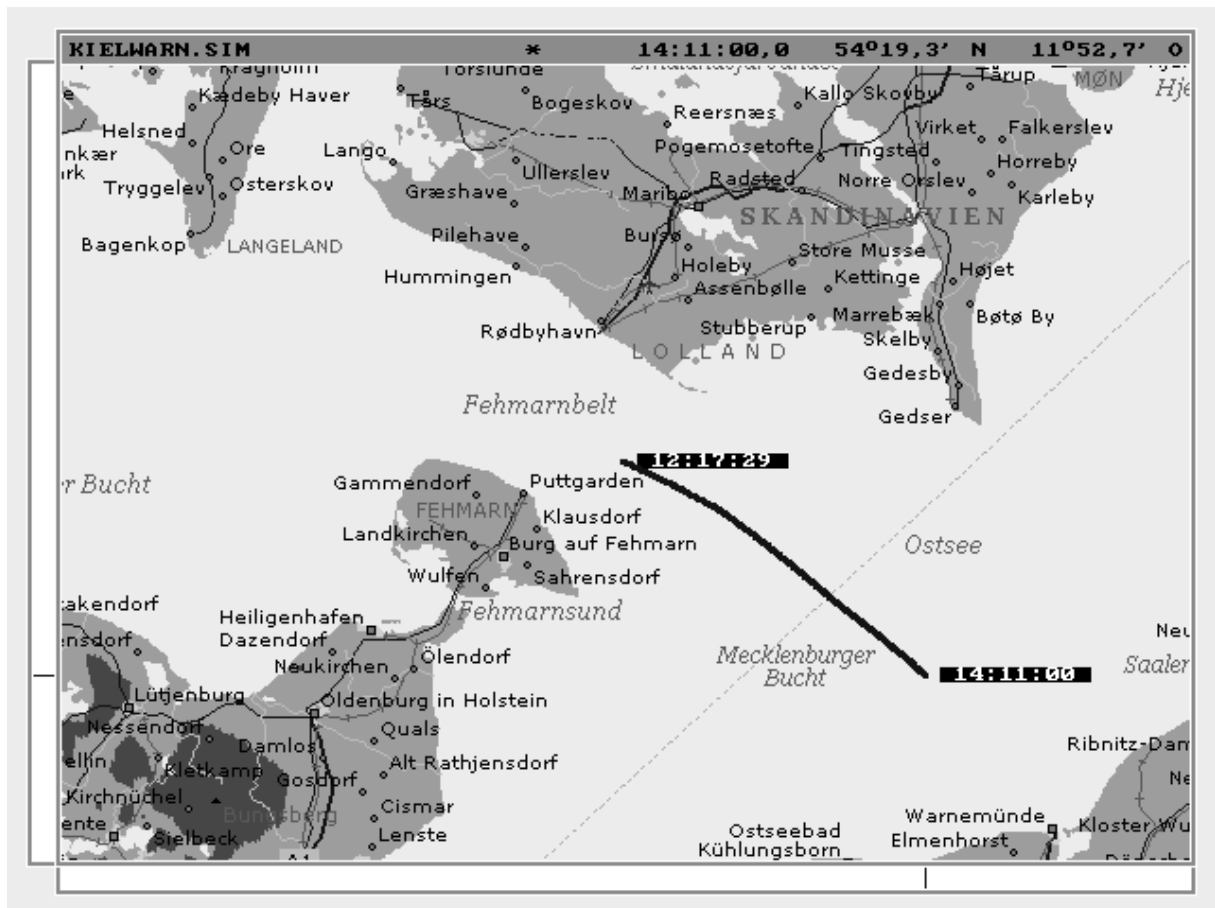
Eine Wartung des Systems wurde im April 2002 im Heimathafen Warnemünde durchgeführt, da die Mannschaft über gelegentliche Fehlfunktionen berichtet hatte, die sich aber als vergleichsweise unproblematisch herausstellten und scheinbar in Verbindung mit der Energieversorgung des Schiffes



Datum des Experiments (Jahr/Monat/Tag):	2002/07/24
Zentralzeit des Experiments (UTC, dezimal):	8,1 h
Zeitdauer des Experiments:	1,9 h
Distanz zwischen erster und letzter Position des Schiffs:	30,8 km
Zentralposition des Schiffs, nördliche Breite:	54,5°
Zentralposition des Schiffs, östliche Länge:	10,3°
Mittlere Höhe über dem Meeresspiegel (orthometrische Höhe):	13,5 m
Luftdruck in Höhe der Messplattform:	1004,0 hPa
Gewichtete mittlere Temperatur der Troposphäre:	4,1 °C
Konversionsfaktor für den Wasserdampfgehalt:	6,3
GPS-Schätzung für die neutrale troposphärische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung:	2417,6 mm
Empirische Standardabweichung für die neutrale Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung:	5,4 mm
Neutrale Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung aus dem Wettermodell:	2418,5 mm
Angenommene Standardabweichung der Laufzeitverzögerung aus dem Wettermodell:	16,1 mm
Hydrostatische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung:	2283,9 mm
Angenommene Standardabweichung der hydrostatischen Laufzeitverzögerung:	2,1 mm
Feuchte troposphärische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung über GPS:	148,8 mm
Feuchte troposphärische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung aus Wettermodell:	134,6 mm
Differenz zwischen beiden Ermittlungen der feuchten Komponente:	14,2 mm
Über GPS abgeleiteter integrierter Wasserdampfgehalt der Troposphäre:	23,8 kg/m²
Genauigkeitsabschätzung für den integrierten Wasserdampfgehalt:	2,3 kg/m²
Empirische Standardabweichung für den integrierten Wasserdampfgehalt:	0,9 kg/m²



Datum des Experiments (Jahr/Monat/Tag):	2002/07/24
Zentralzeit des Experiments (UTC, dezimal):	12,8 h
Zeitdauer des Experiments:	1,6 h
Distanz zwischen erster und letzter Position des Schiffs:	33,1 km
Zentralposition des Schiffs, nördliche Breite:	54,4°
Zentralposition des Schiffs, östliche Länge:	11,6°
Mittlere Höhe über dem Meeresspiegel (orthometrische Höhe):	13,7 m
Luftdruck in Höhe der Messplattform:	1005,3 hPa
Gewichtete mittlere Temperatur der Troposphäre:	3,3 °C
Konversionsfaktor für den Wasserdampfgehalt:	6,3
GPS-Schätzung für die neutrale troposphärische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung:	2401,4 mm
Empirische Standardabweichung für die neutrale Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung:	2,5 mm
Neutrale Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung aus dem Wettermodell:	2400,6 mm
Angenommene Standardabweichung der Laufzeitverzögerung aus dem Wettermodell:	16,1 mm
Hydrostatische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung:	2286,9 mm
Angenommene Standardabweichung der hydrostatischen Laufzeitverzögerung:	2,1 mm
Feuchte troposphärische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung über GPS:	111,5 mm
Feuchte troposphärische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung aus Wettermodell:	113,6 mm
Differenz zwischen beiden Ermittlungen der feuchten Komponente:	-2,1 mm
Über GPS abgeleiteter integrierter Wasserdampfgehalt der Troposphäre:	17,8 kg/m ²
Genauigkeitsabschätzung für den integrierten Wasserdampfgehalt:	0,3 kg/m ²
Empirische Standardabweichung für den integrierten Wasserdampfgehalt:	0,4 kg/m ²



Datum des Experiments (Jahr/Monat/Tag):	2002/12/19
Zentralzeit des Experiments (UTC, dezimal):	13,2 h
Zeitdauer des Experiments:	1,9 h
Distanz zwischen erster und letzter Position des Schiffs:	38,8 km
Zentralposition des Schiffs, nördliche Breite:	54,4°
Zentralposition des Schiffs, östliche Länge:	11,6°
Mittlere Höhe über dem Meeresspiegel (orthometrische Höhe):	12,8 m
Luftdruck in Höhe der Messplattform:	1029,9 hPa
Gewichtete mittlere Temperatur der Troposphäre:	-9,1 °C
Konversionsfaktor für den Wasserdampfgehalt:	6,6
GPS-Schätzung für die neutrale troposphärische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung:	2394,1 mm
Empirische Standardabweichung für die neutrale Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung:	3,3 mm
Neutrale Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung aus dem Wettermodell:	2393,8 mm
Angenommene Standardabweichung der Laufzeitverzögerung aus dem Wettermodell:	15,8 mm
Hydrostatische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung:	2342,8 mm
Angenommene Standardabweichung der hydrostatischen Laufzeitverzögerung:	1,8 mm
Feuchte troposphärische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung über GPS:	50,5 mm
Feuchte troposphärische Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung aus Wettermodell:	50,9 mm
Differenz zwischen beiden Ermittlungen der feuchten Komponente:	-0,4 mm
Über GPS abgeleiteter integrierter Wasserdampfgehalt der Troposphäre:	7,7 kg/m ²
Genauigkeitsabschätzung für den integrierten Wasserdampfgehalt:	0,1 kg/m ²
Empirische Standardabweichung für den integrierten Wasserdampfgehalt:	0,5 kg/m ²

standen, dessen Spannung in bestimmten Fällen kurzzeitig von der erwarteten Versorgungsspannung des GPS-Empfängers abwich und so zu einem Abbruch der Datenaufzeichnung führte.

Bei dieser Gelegenheit wurde das originäre Aufzeichnungsintervall des Empfängers von 1 Sekunde auf 3 Sekunden reduziert, was für die Datenvorverarbeitung völlig ausreicht, hingegen die Dauer der Datenaufzeichnung deutlich erhöhte, da der Trimble-Empfänger nur über einen internen Speicher von 2 MB verfügte, was bei 1 Hz Daten lediglich die Aufzeichnung von Daten über ca. 3 Stunden erlaubte, nun aber zu einer Verdreifachung führte, was für diese Zwecke besser geeignet erschien.

7.3.3 Fahrten im Jahr 2003

Einige wenige Experimente wurden noch Anfang des Jahres 2003 auf der »Bottsand« aufgezeichnet, die in ihrer Qualität den zuvor geschilderten ähneln. Im Januar konnten so noch 12 Versuche mit brauchbaren Resultaten ausgewertet werden.

Es wurde entschieden, die Messkampagne anschließend nicht fortzusetzen. Der Hauptgrund dafür lag in einem unvorhergesehenen Wechsel der wichtigen Besatzungsmitglieder, was eine Neuschulung des neuen Personals erforderlich gemacht hätte.

7.4 Abschließende Bemerkungen

Auf der »Bottsand« wurde ab Ende 2001 GPS-Daten gesammelt, mit einer Intensivmessphase im Jahr 2002 und einigen letzten Experimenten Anfang des Jahres 2003. Die Auswertung dieser Daten konnte eindrucksvoll demonstrieren, dass die GPS-basierte Bestimmung des integrierten Wasserdampfgehalts auch auf einer kinematischen Trägerplattform wie einem Schiff möglich ist. Die Erfolgsrate für Ergebnisse ausreichender Genauigkeit kann mit etwas 50% der Experimente angegeben werden - kein perfektes, aber doch ein für zukünftige Arbeiten auf diesem Gebiet motivierendes Ergebnis.

Folgende Effekte können in diesem Zusammenhang als verbesserungsfähig identifiziert werden:

1. Zunächst verfügte der eingesetzte Empfänger nur über insgesamt 18 Kanäle, d.h. pro Trägerfrequenz konnten nur 9 Satelliten gleichzeitig empfangen werden. Der gegenwärtige Standardempfänger verfügt über 24 Kanäle. Diese Tatsache kann jedoch nicht als ein Problem bezeichnet werden, da auch die bestehende Limitierung grundsätzlich die Aufzeichnung der brauchbaren Signale erlaubte.
2. Weiterhin wird die GPS-Auswertung durch das Auftreten von Phasensprüngen verkompliziert. Können diese nicht fixiert werden, was in kinematischen Szenarien nicht vorausgesetzt werden kann, so müssen neue Mehrdeutigkeitsparameter eingeführt und geschätzt werden, was zu einem Absinken der Bedingungsichte und damit zu einem Genauigkeitsverlust führt. Der Trimble 4400 SSE ist erfahrungsgemäß ein Empfänger, der gerade auf der L_2 -Trägerwelle eher eine mäßige Performance in dieser Hinsicht bietet und keineswegs mit den Spitzengeräten wie dem Ashtech Z-XII mithalten kann, so dass davon ausgegangen werden darf, dass mit besseren Empfängern auch noch längere Glättungsintervalle realisierbar gewesen wären.
3. Das Hauptproblem für diese Anwendung lag aber grundsätzlich in der Einschränkung des verwendeten Navigationssystems, denn trotz voller Ausbaustufe verfügt GPS gegenwärtig über nur so viele Satelliten, dass an einem Ort bei guter Sichtbarkeit nur die Signale von 6 bis 9 Satelliten unter einem Höhenwinkel von 15° (minimal 10° wurden hier genutzt) empfangen werden können. Das mag für viele Anwendungen ausreichen, jedoch nur eingeschränkt für diese hier beschriebene. Eine größere Satellitenzahl bei gleichzeitig homogener Verteilung würde eine höhere »geometrische Strenge« und somit die »Dilution of Precision« (DOP) herabsetzen. Mit dem Aufbau des europäischen Satellitennavigationssystems GALILEO ist in greifbarer Zukunft in diesem Hinblick eine Verbesserung möglich.

8. Abschließende Bemerkungen

8.1 Rückblick

In den Kapiteln 2 bis 3 wurden die Grundlagen der kinematischen Positionierung mit dem gegenwärtigen Navigationssystem GPS sowie das zugehörige Fehlermodell erarbeitet. In den Abschnitten 5 bis 7 wurden wissenschaftliche Anwendungen und erzielte Ergebnisse über große Entfernungen vorgestellt, die an die Grenzen der Leistungsfähigkeit heutiger GPS-Auswertalgorithmik gehen.

So wurde in **Kapitel 5** demonstriert, dass im kinematischen Auswertemodus über Basislinien bis zu ca. 300 km unter guten Voraussetzungen mit hoher Genauigkeit kinematisch positioniert und sogar die Mehrdeutigkeiten fixiert werden können. Die mit Hilfe von Referenzwerten ermittelten Standardabweichungen lagen zumeist zwischen 2 und 3 cm.

In **Kapitel 6** wurde am Beispiel der ENVISAT Radaraltimeter-Kalibrierung aber auch der klare Vorteil der Koordinatenbestimmung über kurze Basislinien deutlich. Während die Standardabweichung dort häufig bei nur 1 cm lag, konnten über lange Distanzen jedoch auch Genauigkeiten im Bereich von 3 cm (gelegentlich ein wenig besser) bis etwa 6 cm erreicht werden, doch gestaltete sich die Fixierung der Mehrdeutigkeiten grundsätzlich deutlich schwieriger. Umso erfreulicher können die erzielten Resultate ohne Festsetzung dieser Terme bezeichnet werden (sog. »Float-Lösung«): Nicht selten lagen die Standardabweichungen in ähnlichen Größenordnungen wie bereits erwähnt, wenngleich in bestimmten Fällen nur Genauigkeiten von 0,1 bis 0,2 dm möglich waren.

Schließlich zeigen die Aussagen in **Kapitel 7**, dass auch im kinematischen Modus die Bestimmung des integrierten Wasserdampfgehaltes möglich ist - einer für Meteorologie und Klimaforschung interessanten Größe, die bisher nur in statischen GPS-Netzwerken abgeleitet wird. Einschränkend muss jedoch festgestellt werden, dass die geforderten Mindestgenauigkeiten von besser oder gleich $3,9 \text{ kg/m}^3$ nur in etwa der Hälfte der durchgeführten Experimente erreicht werden konnte.

Zusammenfassend lässt sich somit feststellen, dass die erzielten Ergebnisse allgemein als recht zufriedenstellend bezeichnet werden können, stets jedoch - und das war im Sinne des Themas dieser Arbeit nicht anders zu erwarten - die Grenzen der Leistungsfähigkeit des gegenwärtigen GPS markieren und dem Wunsch nach weiteren Verbesserungen bzw. Genauigkeitssteigerungen Raum geben. Diese Verbesserungen müssen sich nunmehr aus dem Navigationssystem selbst ergeben, wie bereits abschließend in Kapitel 7 angedeutet wurde. Tatsächlich sind in der näheren Zukunft Innovationen in der Satellitennavigation zu erwarten, die nachfolgend noch kurz beschrieben werden sollen.

8.2 Ausblick

Europa baut mit GALILEO sein eigenes globales Satellitennavigationssystem auf, das einen Technologieschub bewirken sowie die Entwicklung positions- und zeitbasierter Anwendungen vorantreiben soll. Die geplanten Signalstrukturen werden ein bisher unerreicht niedriges Rauschniveau aufweisen. Der wesentliche Nutzwert für wissenschaftliche Anwendungen wird jedoch in der *Kombination* des GPS mit GALILEO liegen, wobei auch bei dem amerikanischen System mit deutlichen Verbesserungen bis ca. 2015 zu rechnen ist.

8.2.1 Verbesserung des GPS

Das seit inzwischen mehr als 10 Jahren voll operationell arbeitende NAVSTAR GPS wird in den kommenden 10 Jahren deutliche Verbesserungen in allen Segmenten des Systems erfahren¹. Für die Klasse der in dieser Arbeit beschriebenen hochpräzisen wissenschaftlichen Anwendungen sind zwei Innovationen im Raumsegment von großer Relevanz:

¹ siehe auch EISSFELLER [2003]

- a) Am 30. September 2005 wurde der erste Block IIR-M Satellit nach erfolgreicher Platzierung im Orbit aktiviert, am 2. Oktober 2006 folgte der zweite - weitere Starts sind in Kürze geplant. Diese Satelliten übertragen - im Gegensatz zu ihren Vorgängern - auch einen **Zivilkode auf der L_2 -Trägerwelle** (L2C)². Bislang wurde nur der verschlüsselte P-Kode übertragen (sog. »Y-Kode«), so dass die L_2 -Trägerphase nur über umständliche Methoden rekonstruiert werden konnte, was zu einem schlechteren Signal-Rausch-Verhältnis und einer wesentlich höheren Empfindlichkeit gegenüber Phasensprüngen führte, was sich insbesondere in ionosphärisch aktiven Zeiten negativ bemerkbar machte. Zukünftig wird GPS ein vollwertiges Zweifrequenz-System sein.
- b) Mit dem Übergang auf die GPS IIF bzw. III Satelliten wird zusätzlich das **L_5 -Signal** bei einer Zentralfrequenz von 1176,45 MHz für die zivile Nutzergemeinde verfügbar werden³. Dieses neue Signal wird eine robustere Verfolgung der Trägerphase erlauben sowie dank seiner Signalstruktur⁴ rauschärmer und gegenüber Mehrwege-Effekten weniger empfindlich sein. Damit wird GPS zu einem Dreifrequenzsystem, was interessante Perspektiven für die Fixierung der Mehrdeutigkeiten eröffnet⁵, da mehr Kombinationsmöglichkeiten gegeben sind. Der Nutzer muss für die Nutzung dieser zusätzlichen Signale keine Gebühren entrichten. Mit dem Start erster Satelliten, die L_5 -Signale aussenden werden, ist nach realistischer Zeitplanung frühestens ab 2006 zu rechnen.

8.2.2 Aufbau von GALILEO

Das ehrgeizige und mit einem sehr strengen Zeitplan versehene GALILEO-Projekt wird dem Nutzer eine Vielzahl von Diensten und Signalen offerieren⁶. Die GALILEO-Satelliten werden ebenso wie die GPS-Satelliten im sog. »mittleren Erdorbit« (MEO - Medium Earth Orbit) platziert⁷, allerdings wird in Vergleich zu GPS eine höhere Orbithöhe von 23.222 km gewählt. 27 Satelliten und 3 passive Ersatzsysteme sollen bei einer Inklination von 56° über 3 Orbitebenen verteilt werden. Die gewählte »Walker-Konstellation« führt zu einer verbesserten Sichtbarkeit der GALILEO-Satelliten unter einer höheren Elevationsmaske im Vergleich zu GPS, was für die Navigation innerhalb von Städten bzw. allgemein bei Vorhandensein von Sichthindernissen bedeutsam werden kann. Galileo wird zur Positionierung nutzbare Signale auf L_1 (jetzt als E_1 zu bezeichnen, 1575,420 MHz) und E_6 (1278,750 MHz) sowie im E_{5ab} -Band übertragen (Zentrum: 1192,795 MHz) übertragen. Weitere Details zum offenen Dienst finden sich in der zwischenzeitlich freigegebenen GALILEO OS SIS ICD⁸. Folgende Gesichtspunkte erscheinen im Rahmen dieser Arbeit bedeutsam:

- a) Da die auf E_6 übertragenen Signale und Daten dem regulierten Dienst PRS⁹ oder aber dem kommerziellen Dienst CS¹⁰ unterliegen werden, kann von einer entgeltfreien Nutzung nicht ausgegangen werden. Allerdings bietet das - ebenso wie L_1 - frei verfügbare Breitbandsignal E_{5ab} verschiedene Möglichkeiten, so dass auch bei GALILEO prinzipiell mindestens 3 Signale zur Positionierung verfügbar stehen; siehe dazu auch Punkt (c).
- b) Das Breitband-Signal E_{5ab} bietet interessante Perspektiven, da Mehrweg-Effekte mit zunehmender Bandbreite wirksamer reduziert werden können. Es ist ferner möglich, die »Sub-Carrier« E_{5a} (1176,45 MHz) und E_{5b} (1207,14 MHz) zu tracken, so dass auf diese Weise bereits 3 Signale zur Verfügung stehen würden. Somit könnte beispielsweise ein hochpräziser geodätischer Kinematik-Empfänger für den Nahbereich zur Verfügung gestellt werden, der über die Möglich-

² siehe RAJAN, TRACY [2003]

³ siehe VAN DIERENDONCK, HEGARTY [2000], TRAN, HEGARTY [2003]

⁴ L_5 -Signal: BPSK(10); gegenwärtiges L_1 -Signal: BPSK(1); siehe auch Abschnitt 8.2.2.4

⁵ siehe z.B. VOLLATH u.a. [1998], BONILLO-MARTÍNEZ u.a. [1999] sowie Abschnitt 8.2.2.8

⁶ für weitere Informationen siehe SCHÄFER, WEBER [2002], LUCAS [2004], EISSFELLER [2004]

⁷ siehe auch MOZO-GARCÍA u.a. [2001]

⁸ Bezug über die Homepage des GALILEO Joint Undertaking: <http://www.galileoju.com/page2.cfm> (16.11.2006)

⁹ PRS: Public Regulated Service

¹⁰ CS: Commercial Service

keit einer sehr schnellen Mehrdeutigkeits-Lösung verfügen könnte. Allerdings bedeutet die Signalverarbeitung mit so hoher Bandbreite wie für E_{5ab} (mehr als 50 MHz) derzeit eine technische Herausforderung, doch deutet sich bereits an, dass Hersteller Empfänger mit diese Trackingfähigkeiten in Zukunft anbieten¹¹.

- c) Wesentliche Vorteile für die hochpräzise geodätische Nutzung ergeben sich aus der Kombination von GPS und Galileo. Diese wird insofern begünstigt, als beide Systeme Signale auf L_1 übertragen und die Zentralfrequenzen von GPS L_5 und Galileo E_{5a} koinzidieren. In diesem Sinne könnte zukünftig ein typischer Zwei-Frequenz-Empfänger beide Systeme auf den angegebenen Trägern berücksichtigen, was im Hinblick auf die Hardware einen vergleichsweise geringen technischen Aufwand bedeuten würde.

8.3 Schlussbemerkungen

Die vorangegangene Darstellung hat gezeigt, dass die in naher Zukunft zu erwartenden Innovationen in der Satellitennavigation deutliche positive Auswirkungen auf die kinematische Positionierung haben werden. Insbesondere die Kombination von GPS und Galileo löst die gegenwärtig existierenden Probleme hinsichtlich der Anzahl sichtbarer Satelliten, was eine deutliche Verbesserung bzgl. des Einsatzes von Mehrdeutigkeits-Suchalgorithmen bedeutet. Die Einführung von datenfreien „Pilotkanälen“ bei Galileo (und auch dem modernisierten GPS) wird zu einem stabileren Phasentracking und damit zu weniger Phasensprüngen führen. Weiterhin öffnen sich neue Möglichkeiten durch die gleichzeitige Verarbeitung von mindestens 3 (oder aber auch mehr) Beobachtungen auf verschiedenen Trägerwellen. Dabei soll freilich nicht unterschlagen werden, dass die atmosphärische Refraktion weiterhin ein Hauptproblem bleibt, das auch weiterhin in geeigneter Weise adressiert werden muss. Eine genaue Abschätzung über die Ausweitung der Basislinien-Länge gestaltet sich recht schwierig, da mit der Verfügbarkeit neuer Signale auch mehr Variationen in den Auswerte-Ansätzen möglich werden. Derartige Untersuchungen sind Gegenstand gegenwärtiger Untersuchungen. In jedem Fall steht außer Frage, dass die im Rahmen dieser Arbeit erzielten Ergebnisse durch die kombinierte Nutzung von GPS- und GALILEO-Messungen weiter verbessert werden könnten. Die Satellitennavigation wird somit auch in Zukunft ein hochgradig interessantes, aber auch herausforderndes Forschungsfeld bleiben.

¹¹ Diese Einschätzung wurde auf Grund mehrerer Gespräche mit Empfängerherstellern auf dem *Munich Satellite Navigation Summit* im März 2006 gewonnen.

9. Bibliografie

ABIDIN, H. Z. [1994]; *On-the-Fly Ambiguity Resolution*; GPS World, S. 40-50, April 1994

ADAM, J.; AUGATH, W.; BOUCHER, C.; BRUYNINX, C.; DUNKLEY, P.; GUBLER, E.; GURTNER, W.; HORNIK, H.; VAN DER MAREL, H.; SCHLÜTER, W.; SEEGER, H.; VERMEER, M.; ZIELINSKI, J. B. [1999]; *The European Reference System Coming of Age*; Proceedings of the IUGG/IAG General Assembly, Birmingham, GB

ALKAN, R. M. [2001]; *GPS-Single Point Positioning Without Selective Availability*; Proceedings of U.S. Hydrographic Conference 2001, The Hydrographic Society of America, 22.-24. Mai 2001; online: http://www.thsoa.org/hy01/13_2.pdf (23.11.2004)

ASHBY, N.; SPILKER, J. J. [1996]; *Introduction to Relativistic Effects on the Global Positioning System*; in: PARKINSON, J. J.; SPILKER, J. J. (Eds.); *Global Positioning System: Theory and Applications*; Volume I, Chapter 18, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 163, American Institute of Aeronautics and Astronautics, ISBN 1-56347-106-X

ASKNE, J.; NORDIUS, H. [1987]; *Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data*; Radio Science, Volume 22, Number 3, Pages 379-386, May-June 1987

ÁVILA-RODRÍGUEZ, J.A.; HEIN, G.W.; IRSIGLER, M.; PANY, T. [2004]; *Combined Galileo/GPS Frequency and Signal Performance Analysis*; Proceedings of the International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GNSS 2004, September 21-24, 2004, Long Beach, California

BAARDA, W. [1968]; *A testing procedure for use in geodetic networks*; Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, 2(4)

BAR-SEVER, Y.; KROGER, P. M.; BORJESSON, J. A. [1998]; *Estimating horizontal gradients of tropospheric path delay with a single GPS receiver*; Journal of Geophysical Research, Vol. 103, No. B3, pp. 5019-5035, March 10, 1998

BASSIRI, S.; HAJJ, G. A. [1993]; *Higher-order ionospheric effects on the global positioning system observables and means of modelling them*; manuscripta geodaetica (1993) 18:280-289, Springer-Verlag

BEVIS, M.; BUSINGER, ST.; HERRING, TH. u.a. [1992]; *GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System*; Journal of Geophysical Research, Vol 97, No. D14, pp. 15,787-15,801, October 20, 1992

BIBERGER, R.; HEIN, G. W.; EISSFELLER, B.; OEHLER, V.; SCHÜLER, T. [2001]; *Pseudolite Signal Creeping on Conducting Surfaces*; Proceedings of ION-GPS 2001, The Institute of Navigation, Salt Lake City, Utah, Sept. 11-14, 2001, pp. 1238-1244

BLOMENHOFER, H. [1996]; *Untersuchungen zu hochpräzisen kinematischen Echtzeitverfahren mit besonderer Berücksichtigung atmosphärischer Fehlereinflüsse*; Dissertation, Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, Nr. 51

BOCK; GOUREVITCH; COUNSELMAN; KING; ABBOT [1986]; *Interferometric analysis of GPS phase observations*; manuscripta geodaetica (1986) 11:282-288

BOCK, Y., NIKOLAIDIS, R. M., DE JONGE, P. J., BEVIS, M. [2000]; *Instantaneous Geodetic Positioning at Medium Distances with the Global Positioning System*; Journal of Geophysical Research, Vol. 105 (B12), S. 28.223 bis 28.253, 10.12.2000

BOLJEN, J. [1996]; *Aktuelle Probleme der Landesvermessung*; Vorlesungsmanuskript zur gleichnamigen Blockveranstaltung im Wintersemester 1996/97 an der Universität Hannover

- BONA, P. [2000]; *Precision, Cross Correlation, and Time Correlation of GPS Phase and Code Observations*; GPS Solutions, Volume 4, Number 2, Fall 2000, S. 3-13, 23.10.2000
- BONILLO-MARTÍNEZ, C.; TOLEDO-LÓPEZ, M.; ROMAY-MERINO, M. [1999]; *The benefits of the GPS three frequencies on the ambiguity resolution techniques*; Proceedings of ION GPS 99, The Institute of Navigation, 14-17 September 1999, Nashville, USA, pp. 1737-1746
- BONNEFOND, P.; EXERTIER, P.; MÉNARD, Y.; JEANSOU, E.; MANZELLA, G.; SPARNOCCHIA, S.; BARLIER, F. [1997]; *Calibration of Radar Altimeters and Validation of Orbit Determination in the Corsica-Capraia Area*; Proceedings of the 3rd ERS Symposium, Florence, Italy; Vol. 3, S. 1525 bis 1528, 1997
- BORN, G. H.; CHRISTENSEN, E. J. u. a. [1994]; *Calibration of TOPEX altimeter using a GPS buoy*; Journal of Geophysical Research, Vol. 99 (C12), S. 24.517 bis 24.526, 1994
- BOUCHER, C.; ALTAMINI, Z. [1996]; *International Terrestrial Reference Frame*; in: GPS-World, 9/96, Seite 71ff
- BRAASCH, M. S. [1996]; *Multipath Effects*; in: *GPS Theory and Applications*, Vol. I, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 163, pp. 547-568, 1996
- BROWN, R. G.; HWANG, P. Y. C. [1997]; *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*; 3rd Edition, John Wiley & Sons, ISBN 0-471-12839-2
- BRUYNINX, C. [1997]; *The Development of the EUREF Permanent GPS Network: Current Status and Future Plans*; Proceedings of ION GPS 97, 16.-19. September 1997, S. 1151-1157, Kansas City, Missouri
- CAMPBELL, J. [2003]; *Accuracy of Vertical Positioning by GPS*; Proceedings of the Workshop „The State of GPS Vertical Positioning Precision: Separation of Earth Processes by Space Geodesy“, 2.-4. April 2003, Luxemburg
- CASIO [1989]; *fx-7500G Bedienungsanleitung*; SH1202071A, Casio Computer Co., Ltd., Tokyo 163, Japan
- CHEN, D. [1993]; *Fast Ambiguity Search Filter (FASF): A Novel Concept for GPS Ambiguity Resolution*; Proceedings of the ION GPS-93, 6th International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation, Salt Palace Convention Center, Salt Lake City, Utah, September 22-24, 1993, pp. 781-787
- COLOMBO, O. L.; HERNANDEZ-PAJARES, M.; MIGUEL JUAN, J.; SANZ, J. [2002]; *Wide-Area, Carrier-Phase Ambiguity Resolution Using a Tomographic Model of the Ionosphere*; Navigation: Journal of The Institute of Navigation, Volume 49, Number 1, Spring 2002, pp. 61-69
- CHRISTENSEN, E. J. u. a. [1994]; *Calibration of TOPEX/POSEIDON at Platform Harvest*; Journal of Geophysical Research, Vol. 99 (C12), S. 24.465 bis 24.485, 1994
- DACH, R. [2000]; *Einfluss von Auflasteffekten auf präzise GPS-Messungen*; Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, DKG, Reihe C, Dissertationen, Heft Nr. 519, ISBN 3 7696 9558 5, München 2000
- DE JONGE, P.; TIBERIUS, CH. [1996]; *The LAMBDA method for integer ambiguity estimation: implementation aspects*; LGR-Series, Publications of the Delft Geodetic Computing Centre, No. 12, TU Delft, August 1996
- DE JONGE, P. J.; TEUNISSEN, P. J. G.; JONKMAN, N. F.; JOOSTEN, P. [2000]; *The distributional dependence of the range on triple frequency GPS ambiguity resolution*; In Proc. of the ION National Technical Meeting, pp. 605-612 (2000), 26-28 January 2000, Anaheim, Ca, USA

- DELOACH, ST. R.; WELLS, D.; DODD, D. [1995]; *Why On-the-Fly?*; GPS World, May 1995, pp. 53-58
- DEMETS, C., R. G. GORDON, D. F. ARGUS, AND S. STEIN [1990]; *Current plate motions*; Geophys. J. Int., 101, 425–478, 1990.
- DENKER, H.; TORGE W. [1998]; *The European Gravimetric Quasigeoid EGG97*; International Association of Geodesy Symposia, Vol. 119, Geodesy on the Move, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, S. 249 bis 254, 1998
- DEWEY, J. F.; PITMAN III, W. C.; RYAN, W. B. F.; BONNIN, J. [1973]; *Plate Tectonics and the Evolution of the Alpine System*; Geol. Soc. Am. Bull. 84, S. 3138-3180
- DGFI [2003]; *DGFI Annual Report 2002/2003*; Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI), München, 2003
- DONG, D. [2003]; *Seasonal vertical variations from GPS-derived site position time series*; Proceedings of the Workshop „The State of GPS Vertical Positioning Precision: Separation of Earth Processes by Space Geodesy“, 2.-4. April 2003, Luxemburg
- DREWES, H. [1998]; *Combination of VLBI, SLR and GPS determined station velocities for actual plate kinematic and crustal deformation models*; in: M. Feissel (Ed.): *Geodynamics, IAG Symposia*, Springer 1998.
- DUAN, J.; BEVIS, M.; FANG, P.; BOCK, Y.; CHISWELL, ST.; BUSINGER ST. u. a. [1996]; *GPS Meteorology: Direct Estimation of the Absolute Value of Precipitable Water*; Journal of Applied Meteorology, Vol. 35, S. 830 bis 838, Juni 1996
- EISSFELLER, B.; TIBERIUS, C.; PANY, T.; BIBERGER, R.; SCHUELER T.; HEINRICHS, G. [2001]; *Real-Time Kinematic in the Light of GPS Modernization and Galileo*; Proc. ION GPS 2001, International Technical Meeting, S. 650-662, September 2001
- EISSFELLER, B. [2003]; *Sachstand und Entwicklungstendenzen von GPS & GLONASS*; Vortrag auf dem Symposium POSNAV 2003, 18. bis 19. März 2003, Dresden
- EISSFELLER, B. [2004]; *Galileo: Das europäische Satellitennavigationssystem*; Bulletin SEV/VSE, Nr. 17/2004, S. 27-31
- EL-MODAWY, A.; SCHWARZ, K. P. [1995]; *Epoch-by-epoch Ambiguity Resolution for Real-Time Attitude Determination Using a GPS Multiantenna System*; Navigation: Journal of the Institute of Navigation, Vol. 42, No. 2, Summer 1995, pp. 391-409
- EMARDSON, T. R. [1998]; *Studies of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System*; Chalmers University of Technology, Sweden, Technical Report No. 339
- EULER, H.-J.; LANDAU, H. [1992]; *Fast Ambiguity Resolution On-The-Fly for Real-Time Applications*; Paper presented at the 60th International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Columbus, Ohio, USA, March 1992
- FISCHER, D.; SCHULZ, TH. C. [2002]; *Auswertung von Multisensordaten zur exakten Bestimmung der instantanen Meeresoberfläche*; Diplomarbeit, Institut für Erdmessung und Navigation, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, Dezember 2002
- FLIEGEL, H. F.; GALLINI, T. E. [1992]; *Global Positioning System Radiation Force Model for Geodetic Applications*; Journal of Geophysical Research, Vol. 97, No. B1, pp. 559-568, January 10, 1992

- FORSSELL, B.; MARTIN-NEIRA, M.; HARRIS, R. A. [1997]; *Carrier Phase Ambiguity Resolution in GNSS-2*; Proceedings of the ION GPS-97, 10th International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation, Kansas City Convention Center, Kansas City, Missouri, September 16-19, 1997, pp. 1727-1736
- FRANCIS, C. R. [1992]; *The height calibration of the ERS 1 radar altimeter*; in Proceedings of the First ERS 1 Symposium - Space at the Service of our Environment, European Space Agency Spec. Publication, ESA SP-359 (I), 381-393, 1992
- FRANCIS, C. R. u. a. [1993]; *The calibration of ERS-1 radar-altimeter – The Venice calibration campaign*; European Space Agency Rep. ER-RP-ESA-RA-0257, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 1993
- FRANCIS, C. R.; ROCA, M. [2000]; *RA-2 In-Orbit Absolute Calibration Plan: Range*; European Space Agency/ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 2000
- FREI, E.; BEUTLER, G. [1990]; *Rapid static positioning based on the fast ambiguity resolution approach "FARA": theory and first results*; manuscripta geodaetica (1990) 15:325-356, Springer-Verlag
- FRIDMAN, A. [1998]; *Methods of Filtering in Instant Ambiguity Resolution and Their Application to RTK-OTF Positioning*; Proceedings of the ION GPS-98, 11th International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation, Nashville Convention Center, Nashville, Tennessee, September 15-18, 1998, pp. 381-388
- GAO, Y.; LIU, Z. Z. [2002]; *Precise Ionosphere Modeling Using Regional GPS Network Data*; Journal of Global Positioning Systems (2002), Vol. 1, No. 1, pp. 18-24
- GARIN, L.; Rousseau, J.-M. [1997]; *Enhanced Strobe Correlator Multipath Rejection for Code & Carrier*; Proceedings of ION GPS 97, The Institute of Navigation, 16-19 September 1997, Kansas City, USA, pp. 559-568
- GE, L.; DAI, L.; HAN, SH.; RIZOS, CH.; ISHIKAWA, Y.; YOSHIDA, Y. [2000]; *GPS Seismometers: the Implementing Issues*; ION GPS 2000, 19-22 September 2000, Salt Lake City, UT, USA, pp. 75-83
- GEISS, E. [1987]; *Die Lithosphäre im mediterranen Raum. Ein Beitrag zu Struktur Schwerfeld und Deformation*; Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Dissertationen, Heft Nr. 332, München
- GENDT, G.; REIGBER, CH.; DICK, G. [1999]; *GPS Meteorology - IGS Contribution and GFZ Activities for Operational Water Vapor Monitoring*; Proceedings of the 5th international seminar "GPS in Central Europe", Penc/Budapest, Hungary, 5-7 May 1999; in: Reports on Geodesy, Warsaw University of Technology, Institute of Geodesy and Geodetic Astronomy, pp. 53ff, no. 5 (46), 1999
- GEORGIADOU, Y.; KLEUSBERG, A. [1988]; *On carrier signal multipath effects in relative GPS positioning*; manuscripta geodaetica (1988) 13:173-179, Springer-Verlag
- GRAIN, L.; VAN DIGGELEN, F.; ROUSSEAU, J.-M. [1996]; *Strobe & Edge Correlator Multipath Mitigation for Code*; Proceedings of the 9th International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation, ION GPS-96, Part 1 of 2, September 17-20, 1996, Kansas City Convention Center, Kansas City, Missouri, USA, pp. 657-664
- GREVE, R. [2001]; *Glacial Isostasy: Models for the Response of the Earth to Varying Ice Load*; in: Straughan, B.; Greve, R.; Ehrentaut, H.; Wang, Y. (Eds.): Continuum Mechanics and Applications in Geophysics and the Environment, ISBN 3-540-41660-9, Springer-Verlag Berlin - Heidelberg - New York, S. 307-325, 2001
- HAINES, B. J.; MÉNARD, Y. [2001]; *Jason-1 Calibration/Validation*; The Earth Observer, Vol. 12, Number 5, pp. 14-17, 2001

HAN, SH. [1995]; *Ambiguity Recovery for GPS Long Range Kinematic Positioning*; Proceedings of the 8th Technical Meeting ION GPS-95, September 1995, USA, pp. 349-360

HAN, S.; RIZOS, CH. [1997]; *An Instantaneous Ambiguity Resolution Technique for Medium-Range GPS Kinematic Positioning*; Proceeding of ION GPS 97, The Institute of Navigation, 16-19 September 1997, Kansas City, USA, pp. 1789-1800

HAN, SH.; RIZOS, CH. [1998]; *The Impact of Two Additional Civilian GPS Frequencies on Ambiguity Resolution Strategies*; Proceedings of the 55th Annual Meeting, June 28-30, 1999, Royal Sonesta Hotel, Cambridge, MA, pp. 315-321

HASSAN, A.; MEZERA, D. [1997]; *Pseudo Randomized Search Strategy Algorithm in Resolving the Ambiguity Resolution*; Proceedings of ION GPS-97, Kansas City, 16.-19.09.1997, S. 1135-1142

HATCH, R.; EULER, H.-J. [1994]; *Comparison of Several AROF Kinematic Techniques*; Proceedings of ION GPS-94, 7th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Salt Palace Convention Center, Salt Lake City, Utah, USA, September 20-23, 1994, Part I, pp. 363-370

HATCH, R.; JUNG, J.; ENGE, P.; PERVAN, B. [2000], *Civilian GPS: The Benefits of Three Frequencies*; GPS Solutions, Vol. 3, No. 4, pp. 1-9 (2000)

HEIDBACH, O. [2000]; *Der Mittelmeerraum - Numerische Modellierung der Lithosphärendynamik im Vergleich mit Ergebnissen der Satellitengeodäsie*; Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Dissertationen, Heft Nr. 525, München 2000, ISSN 0065-5325, ISBN 3 7696 9564 X

HEIN, G.W.; GODET, J.; ISSLER, J.L.; MARTIN, J.C.; ERHARD, P.; LUCAS-RODRIGUEZ, R.; PRATT, T. [2002]; *Status of Galileo Frequency and Signal Design*; Proceedings of ION GPS-2002, 24. bis 27. September 2002, Portland, Oregon, USA, S. 266-277

HEISKANEN, W. A.; MORITZ, H. [1993]; *Physical Geodesy*; Reprint, Institute of Physical Geodesy, Technical University of Graz, Steyrergasse 17, A-8010 Graz, Austria, 1993

HERRING, T. A. [1992]; *Modeling Atmospheric Delays in the Analysis of Space Geodetic Data*; in: DE MUNCK, J. C; SPOELSTRA, T. A. (eds.), *Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy*, Proceedings of the Symposium, Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, New Series, Number 36, The Hague, The Netherlands, May 19-22, 1992

HOFFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. [1993]; *GPS - Theory and Practice*; 2nd Edition, Springer-Verlag Wien, New York, ISBN 3-211-82364-6

HÖPCKE, W. [1980]; *Fehlerlehre und Ausgleichungsrechnung*; de Gruyter Lehrbuch, 227 Seiten, ISBN 3-11-007514-8

IFADIS, I. [1986]; *The Atmospheric Delay of Radio Waves: Modeling the Elevation Dependence on a Global Scale*; Technical Report no. 38L, School of Electrical and Computer Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 1986

IRSIGLER, M. [2000]; *Untersuchung unterschiedlicher empfängerinterner Technologien zur Mehrwege-reduzierung*; Diplomarbeit, Institut für Navigation, Universität Stuttgart, 2000

IRSIGLER, M.; EISSFELLER, B. [2003]; *Comparison of Multipath Mitigation Techniques with Consideration of Future Signal Structures*; Proceedings of GPS ION 2003, 9. bis 12. September 2003, Portland, Oregon, USA, S. 2584-2592

JEFFERSON, D. C.; HEFLIN, M. B.; MUELLERSCHOEN, R. J. [2001]; *Examining the C1-P1 Pseudorange Bias*; GPS Solutions, Vol. 4, No. 4, pp. 25-30 (2001), John Wiley & Sons, 2001

- JONKMAN, N. F. [1998]; *The Geometry-Free Approach to Integer GPS Ambiguity Estimation*; Proceedings of the ION GPS-98, 11th International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation, Nashville Convention Center, Nashville, Tennessee, September 15-18, 1998, pp. 369-379
- JONKMAN, N. F.; TEUNISSEN, P. J. G.; JOOSTEN, P. [2000]; *GNSS long baseline ambiguity resolution: impact of a third navigation frequency*; In: Geodesy beyond 2000. The challenges of the first decade, IAG General Assembly, Vol. 121, Birmingham, July 19-30 (1999), pp. 349-354, Birmingham, UK
- JOOSTEN, P.; TEUNISSEN, P. J. G.; JONKMAN, N. F. [2000]; *GNSS Three Carrier Phase Ambiguity Resolution using the LAMBDA method*; In proceedings of the 3rd European Symposium on Global Navigation Satellite Systems (GNSS'99), 5-8 October 1999, Genova, Italy, pp. 367-372
- JOOSTEN, P.; TIBERIUS, C. [2002]; *LAMBDA: FAQs*; GPS Solutions (2002), Volume 6, pp. 109-114, Springer-Verlag, 2002
- KANIUTH, K.; HUBER, S. [2003]; *Nachweis von Höhenänderungen aufgrund atmosphärischer Druckvariationen aus GPS-Messungen*; ZfV, Heft 4/2003, S. 278-283
- KANIUTH, K.; VETTER, S. [2004]; *GPS Estimates of Postglacial Uplift in Fennoscandia*; ZfV, Heft 3/2004, S. 168-175
- KEITH, J. P. [2000]; *Multipath Errors Induced by Electronic Components in Receiver Hardware*; Proceedings of 2000 National Technical Meeting, The Institute of Navigation, Pacific Hotel Disneyland, Anaheim, California, USA, January 26-28, 2000, pp. 706-715
- KIM, D.; LANGLEY, R. B. [1999]; *An Optimized Least-Squares Technique for Improving Ambiguity Resolution and Computational Efficiency*; Proceedings of ION GPS 99, The Institute of Navigation, 14-17 September 1999, Nashville, USA, pp. 1579-1588
- KIM, D.; LANGLEY, R. B. [1999]; *A Search Space Optimization Technique for Improving Ambiguity Resolution and Computational Efficiency*; Paper presented at GPS99, International Symposium on GPS: Application to Earth Sciences and Interaction with Other Space Geodetic Techniques, Tsukuba, Japan, 18-22 October 1999. A slightly revised version was published in Earth, Planets and Space, Vol. 52 (2000), pp. 807-812.
- KIM, D.; LANGLEY, R. B. [2000]; *GPS Ambiguity Resolution and Validation: Methodologies, Trends and Issues*; Proceedings of the 7th GNSS Workshop - International Symposium on GPS/GNSS, Seoul, Korea, 30 November - 2 December 2000, Tutorial/Domestic Session, pp. 213-221.
- KIM, D.; LANGLEY, R. B. [2000]; *Kalman-filter-based GPS Ambiguity Resolution for Real-time Long-baseline Kinematic Applications*; Paper presented at the 2nd International Workshop on "Satellite Navigation in CEI [Central European Initiative] Area", University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Olsztyn, Poland, 3-5 July 2000.
- KIM, D.; LANGLEY, R. B. [2000]; *GPS Ambiguity Resolution for Long-baseline Kinematic Applications*; Paper presented at the GEOIDE Second Annual Conference, Calgary, 25-26 May 2000.
- KLEINSCHMIDT, M. (Herausgeber) [1989]; *Entwicklung eines standardisierten dreiachsigen Strapdown-sensors zur inertialen Meßwerterfassung für zukünftige Flugregelsysteme*; Litef GmbH, Freiburg, Kurzfassung des Forschungsberichts an das Bundesministerium für Forschung und Technologie
- KNICKMEYER, E. T.; KNICKMEYER, E. H.; NITSCHKE, M. [1995]; *Zur Auswertung kinematischer Messungen mit dem Kalman-Filter*; Fachhochschule Neubrandenburg. Vortrag auf dem 39. Fortbildungsseminar des Dt. Vereins für Vermessungswesen an der Universität Stuttgart im Juni 1995

- KNICKMEYER, E. T. [1996]; *Inertiale Meßverfahren in der Geodäsie*; Fachhochschule Neubrandenburg. Vorlesungsmanuskript zur gleichnamigen Blockveranstaltung im Wintersemester 1996/97 an der Universität Hannover
- KÖBERLE, M.; KRAMER, G. [2002]; *Multi-Sensor-Integration for the Determination of the Precise Position of Swimming Objects*; Diplomarbeit, Institut für Erdmessung und Navigation, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, März 2002
- KOUBA, J.; HÉROUX, P. [2001]; *Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products*; GPS Solutions, Vol. 5, No. 2, pp. 12-28, John Wiley & Sons, 2001
- KREYE, CH.; ZIMMERMANN, B.; HEIN, G. W. [2004]; *Evaluation of Airborne Vector Gravimetry Integrating GNSS and Strapdown INS Observations*; IAG International Symposium Gravity, Geoid and Space Missions, GGSM 2004, Porto, Portugal
- KRUEGER, E. [2004]; *Technical Note WP4300: Consolidation and Verification of Database*; Projekt GSTB V1 STC APAF, Technische Note, Institut für Erdmessung und Navigation, 16. Januar 2004
- KRUEGER, E.; SCHÜLER, T.; HEIN, G. W.; MARTELLUCCI, A.; BLARZINO, G. [2004]; *Galileo Tropospheric Correction Approaches developed within GSTB-V1*; GNSS 2004 - European Navigation Conference, 17-19 May 2004, Rotterdam, The Netherlands
- KUNYSZ, W. [2000]; *High Performance GPS Pinwheel Antenna*; Proceedings of ION GPS 2000, 19-22 September 2000, Salt Lake City, UT, S. 2506-2511
- LACHAPPELLE, G.; CANNON, M. E.; O'KEEFE, K.; ALVES, P. [2002]; *How Will Galileo Improve Positioning Performance*; GPS World, pp. 38-48, September 2003
- LANDAU, H. [1988]; *Zur Nutzung des Global Positioning Systems in Geodäsie und Geodynamik: Modellbildung, Software-Entwicklung und Analyse*; Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München
- LAU, L.; MOK, E. [1999]; *Improvement of GPS Relative Positioning Accuracy by Using SNR*; Journal of Surveying Engineering, ACSE, pp. 185-202, November 1999
- LAWRENCE, A. [1993]; *Modern Inertial Technology. Navigation, Guidance, and Control*; Springer-Verlag.
- LEINEN, ST. [1997]; *Hochpräzise Positionierung über große Entfernungen und in Echtzeit mit dem Global Positioning System*; Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, DGK, Reihe C, Dissertationen, Heft Nr. 472, ISBN 3 7696 9512 7, München 1997
- LI, Z. [1995]; *Efficient Ambiguity Search Using Genetic Algorithms*; Proceedings of the 8th Technical Meeting ION GPS-95, September 1995, USA, pp. 331-337
- LI, Z.; GAO, Y.; SCHLEPPE, J. B. [1997]; *Fast Narrowlane Ambiguity Resolution: Methods and Results*; Proceedings of the ION GPS-97, 10th International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation, Kansas City Convention Center, Kansas City, Missouri, September 16-19, 1997, pp. 1767-1772
- LIU, J.; CANNON, M. E.; ALVES, P.; PETOVELLO, M. G.; LACHAPPELLE, G.; MACGOUGAN, G.; DEGROOT, L. [2003]; *A performance comparison of single and dual frequency GPS ambiguity resolution strategies*; GPS Solutions (2003), 7:87-100
- LÖHNERT, E. [1994]; *Classification and Comparison of On-The-Fly Ambiguity Resolution Techniques*; Group Internal Technical Note, Institute of Geodesy and Navigation, University FAF Munich, Germany, August 19, 1994, 34 pages

- LU, G.; CANNON, M. E.; LACHAPPELLE, G. [1995]; *Improving the Reliability of OTF Ambiguity Resolution with Dual Frequency GPS Observations*; Proceedings of ION GPS 95, The Institute of Navigation, USA, pp. 1111-1116
- LUCAS, R. [2004]; *Status of European Satellite Navigation System GALILEO*; Vortrag auf dem Munich Satellite Navigation Summit, München, März 2004
- MACABIAU, CH. [1995]; *A New Concept for GPS Phase Ambiguity Resolution On-The-Fly: The Maximum a Posteriori Ambiguity Search (MAPAS) Method*; Proceedings of the 8th Technical Meeting ION GPS-95, September 1995, USA, pp. 299-308
- MACABIAU, CH.; BENHALLAM, A. [1996]; *Analysis of the Error Probability and Stopping Time of the MAPAS Procedure*; Proceedings of the 9th Technical Meeting ION GPS-96, September 1996, USA, pp. 925-934
- MACABIAU, CH.; BENHALLAM, A. [2000]; *Practical Evaluation of Performance of MAPAS for Application to Precision Landings*; Proceedings of the ION GPS-97, 10th International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation, Kansas City Convention Center, Kansas City, Missouri, September 16-19, 1997, pp. 1801-1810
- MADER, G. L. [1992]; *Rapid Static and Kinematic Global Positioning System Solutions Using the Ambiguity Function Technique*; Journal of Geophysical Research, Vol. 97, No. B3, S. 3271-3283, 10.03.1992
- MADER, G. L. [1999]; *GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey*; GPS Solutions, Vol. 3, No. 1, Summer 1999, Wiley & Sons
- MARTELLUCCI, A.; SCHÜLER, T. [2004]; *Comparison of Radiometric and GPS Measurements in Balearic Islands with Numerical Weather Prediction Data*; Extended Abstract, 8th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing Applications, Faculty of Engineering, University "La Sapienza", Rome, Italy, 24-27 February 2004
- MCCARTHY, D. D. [1996]; *IERS Technical Note 21, IERS Conventions*; U.S. Naval Observatory
- MCCARTHY, D. D.; PETIT, G. [2003]; *IERS Conventions 2003*; Draft, IERS Technical Note 24, U.S. Naval Observatory, Bureau International des Poids et Mesures, May 2003
- MCGRAW, G. A. [2000]; *Practical GPS Carrier Phase Multipath Mitigation Using High Resolution Correlator Techniques*; Proceedings of the IAIN World Congress in Association with the U. S. ION Annual Meeting, Catamaran Hotel, San Diego, CA, USA, 26-28 June 2000, pp. 373-383
- MÉNARD, Y.; JEANSOU, E.; VINCENT, P. [1994]; *Calibration of the TOPEX/POSEIDON altimeters at Lampedusa*; Journal of Geophysical Research, Vol. 99 (C12), S. 24.487 bis 24.504, 1994
- MENDES, V. B.; PRATES, G.; SANTOS, L.; LANGLEY, R. B. [2000]; *An Evaluation of the Accuracy of Models of the Determination of the Weighted Mean Temperature of the Atmosphere*; Proceedings of ION National Technical Meeting, January 26-28, 2000, Pacific Hotel Disneyland, Anaheim, CA
- MENDES, V.B.; PRATES, G.; PAVLIS, E. C.; PAVLIS, D. E.; LANGLEY, R. B. [2002]; *Improved Mapping Functions for Atmospheric Refraction Correction in SLR*; Geophysical Research Letters, Vol. 29, No. 10, 1414, doi:10.1029/2001GL014394.
- MENGE, F.; SEEGER, G.; VÖKSEN, V. [1998]; *Results of Absolute Field Calibration of GPS Antenna PCV*; Proceedings of GPS-ION 1998, Nashville, Tennessee, USA, 15.-18. September 1998
- MERRIGAN, M. J.; SWIFT, E. R.; WONG, R. F.; SAFFEL, J. T. [2002]; *A Refinement to the World Geodetic System 1984 Reference Frame*; Proceedings of ION GPS 2002, 24.-27. September 2002, S. 1519-1529, Portland, Oregon

- MERVART, L.; BEUTLER, G.; ROTHACHER, M.; WILD, U. [1994]; *Ambiguity resolution strategies using the results of the International GPS Geodynamics Service (IGS)*; Bulletin Géodésique, Springer-Verlag, (1994) 68:29-38
- MILNE, G. A.; DAVIS, J. L.; MITROVICA, J. X.; SCHERNECK, H.-G.; JOHANSSON, J. M.; VERMEER, M.; KOIVULA, H.; *Space-Geodetic Constraints on Glacial Isostatic Adjustment in Fennoscandia*; Science, Vol. 291, pp. 2381-2385, 23 March 2001
- MITCHUM, G. T. [1994]; *Comparison of TOPEX sea surface heights and tide gauge sea levels*; Journal of Geophysical Research, 99 (C12), S. 24.541 bis 24.553, 1994
- MOHAMED, A. H.; SCHWARZ, K. P. [1998]; *A Simple and Economical Algorithm for GPS Ambiguity Resolution on the Fly Using a Whitening Filter*; Navigation: Journal of the Institute of Navigation, Vol. 45, No. 3, Fall 1998, pp. 221-231
- MOPS [1998]; *Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment*; Document No. RTCA/DO-229A, June 8, 1998, prepared by SC-159
- MOZO-GARCÍA, Á.; HERRÁZ-MONSECO, E.; BELÉN, A.; ROMAY-MERINO, M. M. [2001]; *Galileo Constellation Design*; GPS Solutions, Vol. 4, No. 4, pp. 9-15 (2001), John Wiley & Sons, 2001
- NIELL, A. E. [1996]; *Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths*; Journal of Geophysical Research, Vol 101, No B2, pp. 3227-3246, 1996
- OEHLE, V. [2001]; *Entwicklung eines »End-to-End« Simulators zur Satellitennavigation unter besonderer Berücksichtigung von Pseudolite gestützten GNSS-Landesystemen*; Dissertation, Heft 72, Universität der Bundeswehr München, Studiengang Geodäsie und Geoinformation, Neubiberg, 212 Seiten
- OKUNO, J.; NAKADA, M. [2001]; *Effects of water load on geophysical signals due to glacial rebound and implications for mantle viscosity*; Earth Planets Space, 53, pp. 1121-1135, 2001
- PANY, T.; EISSFELLER, B.; WINKEL, J. [2002]; *Analysis of the Ionospheric Influence on Signal Propagation and Tracking of Binary Offset Carrier (BOC) Signals For Galileo And GPS*; Proceedings of the 27th General Assembly of the International Union of Radio Science, Maastricht, The Netherlands, August 2002
- PELZER, H. [1985]; *Grundlagen der mathematischen Statistik und der Ausgleichsrechnung*; in: PELZER, H. (Herausgeber); *Geodätische Netze in der Landes- und Ingenieurvermessung*; Verlag K. Wittwer, Stuttgart, 1985, vergriffen
- POPE, A. J. [1976]; *The Statistics of Residuals and The Detection of Outliers*; NOAA Technical Report NOS 65 NGS 1, U.S. Department of Commerce, Rockville, Md., May 1976
- POUTANEN, M.; OLLIKAINEN, M.; KOIVULA, H.; BILKER, M.; JOKELA, J.; VIRTANEN, H. [2003]; *Global periodic effects in GPS time series*; Proceedings of the Workshop „The State of GPS Vertical Positioning Precision: Separation of Earth Processes by Space Geodesy“, 2.-4. April 2003, Luxemburg
- PRATT, M.; BURKE, B.; MISRA, P. [1997]; *Single-Epoch Integer Ambiguity Resolution with GPS L1-L2 Carrier Phase Measurements*; Proceedings of the ION GPS-97, 10th International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation, Kansas City Convention Center, Kansas City, Missouri, September 16-19, 1997, pp. 1737-1746
- RADOVANOVIC, R. S. [2000]; *High Accuracy Deformation Monitoring Via Multipath Mitigation by Day-to-Day Correlation Analysis*; ION GPS 2000, 19-22 September 2000, Salt Lake City, UT, USA, pp. 35-44

- RAJAN, J. A.; TRACY, J. A. [2003]; *GPS IIR-M: Modernizing the Signal-in-Space*; Proceedings of ION National Technical Meeting, 22. bis 24 Januar 2003, Anaheim, Kalifornien, USA, S. 485-493
- RAY, R. D.; STEINBERG, D. J.; CHAO, B. F.; CARTWRIGHT, D. E. [1994]; *Diurnal and Semidiurnal Variations in the Earth's Rotation Rate Induced by Oceanic Tides*; Science, 264, pp. 830-832.
- REICHERT, A. K.; AXELRAD, P. [2001]; *Carrier-Phase Multipath Corrections for GPS-based Satellite Attitude Determination*; Navigation: Journal of The Institute of Navigation, Vol. 48, No. 2, Summer 2001, pp. 77-88
- REMONDI, B. W. [1984]; *Using the Global Positioning System (GPS) Phase Observable for Relative Geodesy: Modeling, Processing, and Results*; Doctoral Dissertation, Center for Space Research, University of Texas at Austin, May 1984; NOAA Reprint, U. S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service
- REMONDI, B. W. [1991]; *Pseudo-kinematic GPS Results Using the Ambiguity Function Method*; Navigation: Journal of the Institute of Navigation, Vol. 38, No. 1, S. 17-36, Spring 1991
- RIZOS, CH.; HAN, SH. [1995]; *A New Method for Constructing Multi-satellite Ambiguity Combinations for Improved Ambiguity Resolution*; Proceedings of the 8th Technical Meeting ION GPS-95, September 1995, USA, pp. 1145-1153
- ROTHACHER, M.; MERVART, L. (Editors) [1996]; *Documentation of the Bernese GPS Software Version 4.0; User Guide*; Astronomical Institute, University of Berne, Sidlerstrasse 5, CH-3012 Berne, Switzerland, September 1996
- ROTHACHER, M.; SCHMID, R. [2002]; *GPS-Antennenkalibrierungen aus nationaler und internationaler Sicht*; SAPOS-Symposium 2002
- RUIZ VALERO, S. [2001]; *E-Mail on Sea Bottom*; persönlicher Kontakt, 24. Oktober 2001
- SAASTAMOINEN, J. [1972]; *Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellites*; in: Henriksen, The Use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophys. Monogr. Ser., vol. 15, pp. 247-251, AGU, Washington, D.C., 1972
- SANTOS, M. C.; VANICEK, P.; LANGLEY, R. B. [1997]; *Effect of Mathematical Correlation on GPS Network Computation*; Journal of Surveying Engineering, ACSE, pp. 101-112, August 1997
- SARDON, E.; RIUS, A.; ZARRAOA, N. [1994]; *Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from GPS observations*; Radio Science, Vol. 29, No. 3, pp. 577ff
- SAUERMAN, K.; BECKER, M. H.; MATHES, A. [1993]; *Ambiguity Resolution "On-The-Fly" Using the Latest Generation of GPS-Receivers*; Proceedings of ION GPS 93, The Institute of Navigation, 22-24 September 1993, Salt Lake City, USA, pp. 1107-1114
- SCHÄFER, C.; WEBER, T. [2002]; *Das Europäische Satellitennavigationssystem GALILEO - Aktueller Stand der Systemdefinition*; DVW Bayern e.V., Mitteilungen, 54. Jahrgang, S. 367-385, 4.2002
- SCHERNECK, H.-G.; JOHANSSON, J. M.; VERMEER, M.; DAVIS, J. L.; MILNE, G. A.; MITROVICA, J. X. [2001]; *BIFROST project: 3-D crustal deformation rates derived from GPS confirm postglacial rebound in Fennoscandia*; Earth Planets Space, 53, 703-708, 2001
- SCHÜLER, T. [1997]; *Untersuchungen zur GPS/INS-Integration für präzise Echtzeitanwendungen*; Diplomarbeit, Institut für Erdmessung, Universität Hannover

- SCHÜLER, T.; HEIN, G.; EISSFELLER, B. [2000a]; *Improved Tropospheric Delay Modeling Using an Integrated Approach of Numerical Weather Models and GPS*; Proceedings of ION GPS 2000, The Institute of Navigation, Salt Lake City, Utah, USA, 19. bis 22. September 2000
- SCHÜLER, T., G. W. HEIN, and B. EISSFELLER [2000b]; *Towards an Optimal Strategy for GPS Wet Delay Kalman Filtering*; Proceedings of IAIN 2000/ION Annual Meeting, San Diego, Catamaran Hotel, 26-28 June 2000
- SCHÜLER, T. [2001]; *On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation*; Dissertation, Schriftenreihe 73, Studiengang Geodäsie und Geoinformation, Universität der Bundeswehr München, Februar 2001, 360 Seiten
- SCHÜLER, T.; HEIN, G. W.; EISSFELLER, B. [2001a]; *A New Tropospheric Correction Model for GNSS Navigation*; Proceedings of GNSS 2001, V. GNSS International Symposium, Spanish Institute of Navigation, Seville, Spain, May 8-11, 2001
- SCHÜLER, T.; HEIN, G. W.; EISSFELLER, B. [2001b]; *Tropospheric Delay Prediction in Wide Area Augmentation Systems Using Numerical Weather Fields*; Proceedings of KIS 2001, Banff, Alberta, Canada, June 5-8, 2001
- SCHÜLER, T.; PÓSFAY, A.; HEIN, G. W. ; BIBERGER, R. [2001c]; *A Global Analysis of the Mean Atmospheric Temperature for GPS Water Vapor Estimation*; Proceedings of ION-GPS 2001, The Institute of Navigation, Salt Lake City, Utah, Sept. 11-14, 2001, pp. 2476-2489
- SCHÜLER, T. [2002]; *Geodynamik*; Skript und Übungen zur Vertiefervorlesung, Studiengang „Geodäsie und Geoinformation“, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, Juli 2002
- SCHÜLER, T.; HEIN, G. W. [2004]; *ENVISAT Radar Altimeter Calibration with High-Sea GPS Buoys*; ESA Publications Division (EPD), Special Publication SP-572, Proceedings of the ENVISAT Symposium, 6-10 September 2004, Salzburg, Austria
- SCHWIEGER, V. [1999]; *Ein Elementarfehlermodell für GPS-Überwachungsmessungen - Konstruktion und Bedeutung interepochaler Korrelationen*; Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 231, ISSN 0174-1454, Hannover 1999
- SEEBER, G. [1989]; *Satellitengeodäsie*; Verlag de Gruyter, Berlin - New York, 1993
- SEEBER, G. [1993]; *Satellite Geodesy - Foundations, Methods, and Applications*; Berlin; New York: de Gruyter, 1993, ISBN 3-11-012753-9
- SJÖBERG, L. [1998]; *On the estimation of GPS phase ambiguities by triple frequency phase and code data*; ZfV 5/1998, pp. 162ff
- SLEEWAEGEN, J.-M. [1997]; *Multipath Mitigation, Benefits from using the Signal-to-Noise Ratio*; Proceedings of ION GPS 97, The Institute of Navigation, 16-19 September 1997, Kansas City, USA, pp. 531-541
- SOLBRIG, P. [2000]; *Untersuchungen über die Nutzung numerischer Wettermodelle zur Wasserdampfbestimmung mit Hilfe des Global Positioning Systems*; Diplomarbeit, Institut für Erdmessung und Navigation, Universität der Bundeswehr München
- SONNTAG, J. G.; MARTIN, C. F. [1995]; *Ambiguity Resolution Over Long Baselines for Airborne Differential GPS Positioning*; Proceedings of ION GPS 95, The Institute of Navigation, USA, pp. 1117-1126
- SPILKER, J.; PARKINSON [1996]; *Tropospheric Effects on GPS*; in: GPS Theory and Applications, Vol I, pp. 517ff; Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 163

- SPIPKER, J. [1996]; *GPS Signal Structure and Theoretical Performance*; in: W. Parkinson and J. Spilker: *GPS Positioning System Theory and Applications*, Progress in Astronautics and Aeronautics Vol. 163. American Institute of Aeronautics and Astronautics., pp. 57-120, 1996
- SUTTON, E. [1997]; *Optimal Search Space Identification for Instantaneous Integer Cycle Ambiguity Resolution*; Proceedings of the ION GPS-97, 10th International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation, Kansas City Convention Center, Kansas City, Missouri, September 16-19, 1997, pp. 313-322
- TALBOT, N. C. [1991]; *Sequential phase ambiguity resolution for real-time static differential GPS monitoring*; manuscripta geodaeica (1991) 16:274-282, Springer-Verlag
- TALKOVSKI, A. [2004]; *Implementierung eines Starrkörpermodells für den Mittelmeerraum*; Diplomarbeit, Studiengang Geodäsie und Geoinformation, Universität der Bundeswehr München, betreut am Institut für Erdmessung und Navigation, Neubiberg
- TAUBENHEIM, J. [1969]; *Statistische Auswertung geophysikalischer und meteorologischer Daten*; Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig 1969
- TEUNISSEN, P. J. G.; DE JONGE, P. J.; TIBERIUS, C. C. J. M. [1995]; *A New Way to Fix Carrier-Phase Ambiguities*; GPS World, April 1995, pp. 58-61
- TEUNISSEN, P. J. G.; ODIJK, D. [1997]; *Ambiguity Dilution of Precision: Definition, Properties and Application*; Proceedings of the ION GPS-97, 10th International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation, Kansas City Convention Center, Kansas City, Missouri, September 16-19, 1997, pp. 891-899
- TEUNISSEN, P. J. G. [2000]; *Integer least-squares statistics for three frequency GPS/GNSS ambiguity resolution*; In: Proc. of the 18th AIAA International Communication Satellite Systems Conference and Exhibit, 10-14 April 2000, Oakland, Ca, USA, Vol. 2, pp. 838-846
- TEUNISSEN, P. J. G.; JONKMAN, N. F.; JOOSTEN, P.; TIBERIUS, C. C. J. M. [2000]; *Long baseline 3 frequency differential GNSS*; In: Proc. of the IEEE Position Location and Navigation Symposium, San Diego, Ca, March 13-16, 2000, pp. 7-14
- TEUNISSEN, P. J. G. [2002a]; *A New Class of GNSS Ambiguity Estimators*; Artificial Satellites, Vol. 37, No. 4, 2002
- TEUNISSEN, P. J. G. [2002b]; *A Gauss-Markov-Like Theorem for Integer GNSS Ambiguities*; Artificial Satellites, Vol. 37, No. 4, 2002
- TEUNISSEN, P. J. G. [2003a]; *Theory of Carrier Phase Ambiguity Resolution*; Wuhan University Journal of Natural Sciences, Vol. 8, Nr. 2B, S. 471-484
- TEUNISSEN, P. J. G. [2003b]; *Integer Aperture GNSS Ambiguity Resolution*; Artificial Satellites, Vol. 38, No. 3, 2003
- TEUNISSEN, P. J. G. [2003c]; *A Carrier-Phase Ambiguity Estimator With Easy-to-Evaluate Fail-Rate*; Artificial Satellites, Vol. 38, No. 3, 2003
- TIBERIUS, C. C. J. M.; BORRE, K. [1999]; *Probability distribution of GPS code and phase data*; Zeitschrift für Vermessungswesen, Ausgabe 124 (8), S. 264-273
- TIBERIUS, CH.; JOOSTEN, P. [2001]; *Galileo about to Move Ahead*; GIM International, March 2001, pp. 14-17

- TIBERIUS, C.; PANY, T.; EISSFELLER, B.; DE JONG, K.; JOOSTEN P.; VERHAGEN, S. [2002]; *Integral GPS-Galileo ambiguity resolution*; Proc. GNSS 2002, Copenhagen, 2002
- TORGE, W. [1989]; *Gravimetry*; Walter de Gruyter, Berlin – New York 1989
- TOWNSEND, B. u. a. [1995]; *Performance Evaluation of the Multipath Estimating Delay Lock Loop*; Navigation 42, No. 3, Fall 1995, 503 . 514
- TRAN, M.; HEGARTY, C. [2003]; *Performance Evaluations of the New GPS L5 and L2 Civil (L2C) Signals*; Proceedings of ION National Technical Meeting, 22. bis 24 Januar 2003, Anaheim, Kalifornien, USA, S. 521-535
- TREGONING, P.; MORGAN, P. J.; COLEMAN, R. [2003]; *The effect of receiver firmware upgrades on GPS vertical timeseries*; Proceedings of the Workshop „The State of GPS Vertical Positioning Precision: Separation of Earth Processes by Space Geodesy“, 2.-4. April 2003, Luxemburg
- TURCOTTE, D. L.; SCHUBERT, G. [1982]; *Geodynamics - Applications of Continuum Physics to Geological Problems*; John Wiley & Sons, New York, 1982
- UENO, M.; SANTERRE, R. [2000]; *A Combined Method for Ambiguity Resolution with Single-Frequency Receivers: Application for Ship Berthing*; Navigation: Journal of the Institute of Navigation, Vol. 47, No. 1, Spring 2000, pp. 100-111
- UENO, M.; SANTERRE, R.; LANGELIER, D.; MARCEAU, G. [2000]; *Improvement of GPS Ambiguity Resolution Using Height Constraint for the Support of Bathymetric Survey*; Proceedings of the IAIN World Congress in association with the U. S. ION ANNUAL MEETING, 26-28 June 2000, San Diego, CA, pp. 842-850
- VAN DIERENDONCK, A.; HEGARTY, C. [2000]; *The New L5 Civil GPS Signal*; GPS World, Vol. 11, No. 9, pp. 64-71, 2000
- VAN NEE, R. u. a. [1994]; *The Multipath Estimating Delay Lock Loop: Approaching Theoretical Accuracy Limits*; Proceedings of the IEEE Position, Location and Navigation Symposium, Las Vegas, Nevada, April 1994
- VERHAGEN, S. und JOOSTEN, P. [2003]; *Algorithms for Design Computations for Integrated GPS-Galileo*; GNSS 2003, The European Navigation Conference, 22.-25.04.2003, Graz, Österreich, 14 Seiten
- VOLLATH, U.; BIRNBACH, S.; LANDAU, H.; FRAILE-ORDONEZ, J. M.; MARTIN-NEIRA, M. [1998]; *Analysis of Three-Carrier Ambiguity Resolution (TCAR) for Precise Relative Positioning in GNSS-2*; Proceedings of the 11th Technical Meeting ION GPS-98, September 15-18, 1998, Nashville Convention Center, Nashville, Tennessee, pp. 417-426
- WANNINGER, L. [2000]; *Interpolation von GPS-Beobachtungen*; Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), Heft 10/2000, 107:360-363
- WANNINGER, L.; FREVERT, V.; WILDT, ST. [2000]; *Der Einfluss der Signalbeugung auf die präzise Positionierung mit GPS*; Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV), I/2000, Dt. Verein für Vermessungswesen, pp. 8-16, Heft 1, 2000
- WEI, M. ; SCHWARZ, K.-P. [1995]; *Fast Ambiguity Resolution Using an Integer Nonlinear Programming Method*; Proceedings of the 8th Technical Meeting ION GPS-95, September 1995, USA, pp. 1101-1110
- WELSCH, W.; HEUNECKE, O.; KUHLMANN, H. [2000]; *Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen*; Handbuch Ingenieurgeodäsie, Heidelberg, Verlag Wichmann

- WERNER, W. [1999]; *Entwicklung eines hochpräzisen DGPS-GLONASS Navigationssystems unter besonderer Berücksichtigung von Pseudolites*; Dissertation, Schriftenreihe, Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, Heft 64
- WERNER, W.; WINKEL, J. O. [2003]; *TCAR and MCAR Options With Galileo and GPS*; Proceedings of GPS ION 2003, 9. bis 12. September 2003, Portland, Oregon, USA, S. 790-800
- WHITE, N. J., COLEMAN, R., CHURCH, J. A., MORGAN, P. J., WALKER, S. J. [1994]; *A southern hemisphere verification for the TOPEX/POSEIDON satellite altimeter mission*; Journal of Geophysical Research, Vol. 99 (C12), S. 24.505 bis 24.516, 1994
- WILLIAMS, S. D. P.; BOCK, Y.; FANG, P. [2003]; *Error Analysis of Continuous GPS Height Position Time Series*; Proceedings of the Workshop „The State of GPS Vertical Positioning Precision: Separation of Earth Processes by Space Geodesy“, 2.-4. April 2003, Luxemburg
- WILSON, B. D.; MANNUCCI, A. J. [1993]; *Instrumental Biases in Ionospheric Measurements Derived from GPS Data*; Proceedings of the ION-GPS-93, Volume II, 6th Int. Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation, Salt Palace Convention Center, Salt Lake City, Utah, September 22-24, 1993, pp. 1343-1351
- WU, J. T.; WU, S. C.; HAJJ, G. A.; BERTIGER, W. I.; LICHTEN, S. M. [1993]; *Effects of antenna orientation of GPS carrier phase*; manuscripta geodaetica (1993) 18:91-98, Springer-Verlag 1993
- WU, J.; YIU, F.-G. [1997]; *Cosine Functions of GPS Carrier Phases for Parameter Estimation*; Journal of Surveying Engineering, ACSE, pp. 113-125, August 1997
- WU, J.; HUANG, Z.-M. [2002]; *Spatially convergent GPS kinematic positioning*; GPS Solutions (2002), Volume 6, pp. 3-10, Springer-Verlag, 2002
- WÜBBENA, G. [1991]; *Zur Modellierung von GPS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung*; Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 168, Hannover 1991
- ZEBHAUSER, B. [1999]; *Zur Entwicklung eines GPS-Programmsystems für Lehre und Tests unter besonderer Berücksichtigung der Ambiguity Function Methode*; Dissertation, Technische Universität München, Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie
- ZHDANOV, A.; VEITSEL, V.; ZHODZISHSKY, M.; ASHJAEI, J. [1999]; *Multipath Error Reduction in Signal Processing*; Proceedings of ION GPS 99, The Institute of Navigation, 14-17 September 1999, Nashville, USA, pp. 1217-1223
- ZHDANOV, A.; ZHODZISHSKY, M.; VEITSEL, V.; ASHJAEI, J. [2002]; *Evolution of Multipath Error Reduction with Signal Processing*; GPS Solutions, Vol. 5, No. 3, pp. 19-28, 2002

Danksagung

Die vorliegende Arbeit repräsentiert einen Querschnitt aus den eigenen Forschungsarbeiten zwischen den Jahren 2001 und 2004. Sie wäre ohne die Unterstützung des Instituts für Erdmessung und Navigation (Universität der Bundeswehr München) nicht durchführbar gewesen, ebenso wenig ohne die Unterstützung einer Reihe von Personen, denen an dieser Stelle ausdrücklich gedankt wird.

Kapitel 2 und 3 - Grundlagen, Fehlermodell: Besonderer Dank gilt Dr. Wolfgang Werner (IfEN GmbH) für wertvolle Diskussionen und Ratschläge zu verschiedenen Bereichen der Algorithmik im Zusammenhang mit der kinematischen Positionsbestimmung sowie der Mehrdeutigkeitsbestimmung. Eva Krueger sei für ihre Hilfe bei der Berechnung der atmosphärischen Korrelationsfunktionen und für die Korrekturlesungen gedankt.

Kapitel 4 - Referenzstationen: Die dargestellte Analysen verwenden die frei zugänglichen EUREF-Wochenlösungen (Kombinationslösungen). Den Betreibern des Netzwerkes und der Analysezentren sei für ihre Unterstützung gedankt.

Kapitel 6 - ENVISAT Radaraltimeter-Kalibrierung: Herrn Mika und Herrn Gülck vom Wasser- und Schifffahrtsamt Cuxhaven wird für die Bereitstellung und Modifikation der Tonnen sowie für die geleistete Beratung während des Projektes gedankt. Der Aufbau des Messsystems wäre nicht ohne die sorgfältige Planung von Bernhard Riedl sowie die tatkräftige Unterstützung von Gerrit Kramer und Markus Köberle möglich gewesen. Bernd Zimmermann wird für die Erstellung der Referenzlösungen gedankt. Die GPS-Daten für die Experimente über lange Basislinien entstammen dem IGS Netzwerk, die statischen Prozessierungsaufgaben wurden maßgeblich unter Nutzung von Daten des EUREF-Netzwerkes realisiert. Den Netzbetreibern sei jeweils für die Bereitstellung der Daten gedankt. Die Gezeitenkorrektur wurde mit Hilfe der in Bojennähe auf dem Meeresboden durchgeführten Druckpegelmessungen ermittelt, die von Herrn Richter und Dr. Liebsch (TU Dresden) freundlicherweise bereitgestellt wurden.

Kapitel 7 - BALTIMOS/Wasserdampfbestimmung auf Schiffen: Frau Dr. Jacob vom Max-Planck-Institut für Meteorologie (Hamburg) sei für die Realisierung des zugehörigen Projektes gedankt. Herrn Dr. Brümmer wird für die Einbeziehung der GPS-Messungen in die Messkampagnen an Bord des Forschungsschiffes »Alkor« und Frau Dr. Kirchgäßner für die Aufbereitung und Bereitstellung der Radiosondenprofile gedankt. Ebenso gilt der Mannschaft des Motorschiffs »Bottsand« (Kapitän Strohegger) besonderer Dank, die für mehr als ein Jahr zuverlässig und engagiert GPS-Daten in der Ostsee aufgezeichnet hat.

Ich danke abschließend Herrn Prof. Dr. Seeber für die fristgerechte Begutachtung der Arbeit sowie Prof. Dr. Hein und Prof. Dr. Eissfeller für die Unterstützung dieser Arbeit und der Übernahme der Gutachter-Tätigkeit.